

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Guillaume MANTELET

DÉFINITION D'UN PLAN DE CONTRÔLE POUR LES RÉSEAUX OPTIQUES SANS
FILTRE

MONTRÉAL, LE 24 OCTOBRE 2012

©Tous droits réservés, Guillaume Mantelet, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Christine Tremblay, directrice de thèse
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. David V. Plant, codirecteur de thèse
Département de génie électrique et informatique à l'Université McGill

M. Éric David, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. François Gagnon, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure.

M. Michel P. Bélanger, examinateur externe
Ciena Corp.

Mme Brigitte Jaumard, examinateur externe
Department of Computer Science and Software Engineering, Concordia University

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 27 SEPTEMBRE 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je profite de cette brève page pour effectuer d'abord quelques remerciements chaleureux à Christine Tremblay, directrice de thèse, d'abord pour m'avoir permis de participer au projet des réseaux sans filtre mais aussi pour le soutien précieux qu'elle a su m'accorder tout au long de ces années, surtout dans les moments les plus pénibles, ainsi qu'à David V. Plant, codirecteur.

Un merci à Michel Bélanger, de chez Ciena, pour l'implication constante ainsi que son apport de commentaires et de données qui m'ont été particulièrement utiles pour la rédaction des divers articles et de la présente thèse. J'en profite tout autant pour saluer Paul Littlewood, mais aussi David Boertjes pour leurs conseils efficaces autour du téléphone.

Une pensée aussi aux « coreligionnaires », membres de l'équipe de recherche des réseaux optiques sans filtre, Alfredo Enriquez, Jean-Philippe Savoie, Philippe Blanchard, Émile Archambault, Andrew Cassidy, Zhenyu Xu et Fabian Vergara, avec qui nous avons pu échanger beaucoup d'idées.

Enfin, toute aide dans mes études aurait été vaine sans la patience et le support de mon entourage qui m'a aidé à affronter d'autres défis pendant ce doctorat. Je remercie mes parents et mes frères qui ont été de tous les instants pendant ma longue convalescence, mais aussi Kays et Souha pour leurs encouragements le long de la dernière ligne droite.

DÉFINITION D'UN PLAN DE CONTRÔLE POUR LES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

Guillaume MANTELET

RÉSUMÉ

Les réseaux optiques de prochaine génération sont destinés à faire face au succès croissant des applications Internet. Les architectures optiques doivent ainsi s'adapter au succès de l'Internet et de la donnée face à la voix, ce qui se traduit par des exigences en termes de reconfigurabilité et de simplicité d'opération, et ce pour accommoder des trafics de plus en plus imprédictibles et de types divers.

Les réseaux tout optiques basés sur des commutateurs actifs, comme les « cross-connect » (OXC) ou les commutateurs sélectifs en longueur d'onde (WSS) sont à même de fournir ces aspects dans l'établissement dynamique et automatique des connexions optiques. L'agilité et la reconfigurabilité, dépendantes d'un plan de contrôle robuste et autonome déployant les derniers concepts de découverte du voisinage, de la gestion des connexions, et de routage intelligent en cas de maintenance ou de bris, viennent toutefois de pair avec un coût de déploiement plus élevé.

Dans cette thèse, nous rappelons les principes des réseaux optiques sans filtre illustrés dans les travaux précédents. Un réseau optique sans filtre implémente les dernières avancées dans les lasers accordables, les récepteurs cohérents en fréquence, les formats de modulation avancés ou encore la compensation électronique de la dispersion, pour pouvoir remplacer les composants actifs de commutation par des diviseurs et des combineurs de puissance optiques passifs adaptés. De cette façon, l'agilité est déplacée aux nœuds émetteurs et aux destinataires associés.

Nous présentons aussi les particularités intrinsèques à ces réseaux, comme les canaux non filtrés, les ports émetteurs en amont et en aval, ou encore les concepts de boucle laser et de réutilisation de longueurs d'onde, et nous montrons comment il est possible de développer d'autres façons d'opérer ces réseaux comme les bus de diffusion multipoint à multipoint, à la condition cependant de définir un plan de contrôle spécialisé sans lequel ces concepts pourraient nuire aux performances et aux connexions existantes.

Finalement, un simulateur permet de reproduire ces concepts et de sélectionner les meilleures solutions issues des travaux antérieurs par le biais de métriques, telles le nombre de canaux par lien, incluant les canaux non filtrés, et d'une mesure de la quantité de requêtes bloquées. Nous montrons enfin, avec une étude finale des coûts et de la consommation électrique, comment il est possible de retenir des solutions prometteuses vis-à-vis des réseaux photoniques actifs.

Mots clés : Contrôle, réseaux optiques, lasers accordables, récepteurs cohérents

DÉFINITION D'UN PLAN DE CONTRÔLE POUR LES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

Guillaume MANTELET

ABSTRACT

Next generation optical networks have to cope with the wide popularity of broadband applications, including video on demand and (3D) high-definition video streaming. This success of the Internet involves a strain in the physical layer because optical architectures need to be simple and reconfigurable at the same time so as to deal with an increase of the different traffic types and of their unpredictability.

Usually, all optical networks are based on active switching devices such as optical cross connects (OXC) or wavelength selective switches (WSS) in the dynamic and automatic lightpath establishment process. Agility and reconfigurability come however at the expense of a relatively high cost, and require an efficient control plane which supports the last concepts in terms of automated self-discovery, automated connection management, efficient operation and self-healing abilities.

In this thesis, we recall the principles of filterless optical networks as a cost-effective solution for metropolitan and wide area networks. A filterless network exploits recent breakthroughs in tunable lasers, frequency selective coherent receivers, advanced modulation formats, and electronic dispersion compensation, in order to move agility only at the emitters and their corresponding receivers, by the use of passive optical splitters and combiners for link interconnections at intermediate nodes and local-add drop in the place of active switching devices.

We then present the peculiar features of filterless networks, which make them passive *broadcast and select* networks, such as unfiltered channels, backward and forward ports, closed loops, wavelength reuse, and show how they can enrich the manner one can operate such a network as well as how they can harm established connections if not properly handled by a control plane.

At last, we present a filterless optical control plane simulator and show how the concept of unfiltered channel is important to be mitigated so as to keep network performance at its best; as the unfiltered channels still propagate after reaching their destination, they also participate in wavelength contention and increase the blocking probability for new paths to be established. We also introduce a new metric to validate filterless solutions obtained from previous works based on the ability of these solutions to deal with unfiltered channels, given a traffic matrix, and show how, through cost and power dissipation analysis, it is possible to select the most effective solution.

Keywords: Control, optical networks, tunable lasers, coherent receivers

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|---|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 ÉTAT DES RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATION | 7 |
| 1.1 Le succès d'Internet | 7 |
| 1.2 Le potentiel de la fibre optique | 10 |
| 1.3 Développement de solutions flexibles | 11 |
| 1.3.1 Réseaux opaques | 12 |
| 1.3.2 Réseaux transparents | 12 |
| 1.3.3 Définition d'un commutateur sélectif en longueur d'onde | 14 |
| 1.3.4 Présentation des pistes optiques | 15 |
| 1.4 Plans de contrôle | 17 |
| 1.4.1 Les fonctions des plans de contrôle | 18 |
| 1.4.2 Grandes familles de protocoles de contrôle | 19 |
| 1.4.3 Architectures de plan de contrôle | 20 |
| 1.5 Conclusion | 24 |
| CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE | 27 |
| 2.1 Présentation d'un réseau optique sans filtre | 27 |
| 2.1.1 Comparaison avec un réseau photonique actif transparent | 27 |
| 2.1.2 Présentation d'un réseau optique sans filtre | 28 |
| 2.2 Définition d'un réseau optique sans filtre | 30 |
| 2.2.1 Présentation des concepts | 30 |
| 2.2.1.1 Réseau de diffusion passive | 30 |
| 2.2.1.2 Canal de contrôle, lasers accordables et récepteurs cohérents ... | 31 |
| 2.2.1.3 Connexions en un saut | 31 |
| 2.2.2 Technologies habilitantes | 32 |
| 2.2.3 Présentation d'une architecture nodale optique sans filtre | 35 |
| 2.3 Étapes de conception d'un réseau sans filtre | 38 |
| 2.3.1 Routage | 39 |
| 2.3.2 Assignation de longueurs d'onde | 43 |
| 2.3.3 Présentation des réseaux optiques semi sans filtre | 44 |
| 2.3.4 Validation physique | 46 |
| 2.4 Problématique associée aux réseaux optiques sans filtre | 47 |
| 2.4.1 Notion de canal non filtré | 48 |
| 2.4.2 Gestion des collisions de longueur d'onde | 50 |
| 2.4.3 Formation de boucles lasers | 50 |
| 2.4.4 Insertion d'un nœud dans une topologie existante | 52 |
| 2.4.5 Insertion de contenu local | 54 |
| 2.4.6 Réutilisation des longueurs d'onde | 56 |
| 2.5 Conclusion | 59 |

| | |
|--|--|
| CHAPITRE 3 PRÉSENTATION D'UN PLAN DE CONTRÔLE POUR LES RÉSEAUX | |
| | OPTIQUES SANS FILTRE 61 |
| 3.1 | Choix de l'architecture de plan de contrôle 61 |
| 3.1.1 | Solution centralisée, solution distribuée 61 |
| 3.1.2 | Quantité de données de contrôle à échanger 62 |
| 3.1.3 | Routage centralisé, signalisation distribuée et explicite 63 |
| 3.1.4 | Solution retenue pour les réseaux optiques sans filtre 64 |
| 3.2 | Choix de l'élément de calcul de chemin 64 |
| 3.3 | Un modèle de plan de contrôle de type <i>overlay</i> pour les réseaux optiques sans filtre 67 |
| 3.4 | Détection des boucles laser 69 |
| 3.4.1 | Canal de contrôle régénéré à chaque nœud 70 |
| 3.4.2 | Port de sortie déconnecté 70 |
| 3.4.3 | Découverte du voisinage interne 72 |
| 3.4.4 | Découverte du voisinage et insertion d'un nouveau nœud 75 |
| 3.4.5 | Procédé de mise à jour de la topologie 76 |
| 3.5 | Routage, assignation de longueur d'onde et gestion des canaux non filtrés 77 |
| 3.5.1 | Caractéristiques des réseaux optiques passifs 78 |
| 3.5.2 | Règles sur le choix d'un arbre et de la sélection de la longueur d'onde... 78 |
| 3.5.2.1 | Définition des ports émetteurs en amont et en aval 78 |
| 3.5.2.2 | Gestion de la sélection des longueurs d'onde pour éviter les collisions de longueur d'onde 80 |
| 3.5.2.3 | Algorithme de détermination des ports émetteurs en amont et en aval 81 |
| 3.5.3 | Routage par arbre 88 |
| 3.5.4 | Protection 90 |
| 3.5.5 | Assignation des longueurs d'onde 90 |
| 3.6 | Validation physique 91 |
| 3.6.1 | Stratégie du pire en premier 91 |
| 3.6.2 | Hypothèses sur une ligne de transmission optique sans filtre 91 |
| 3.6.2.1 | Rappel d'une ligne de transmission optique sans filtre 91 |
| 3.6.2.2 | Contraintes physiques susceptibles de dégrader le signal 92 |
| 3.6.2.3 | Hypothèses du modèle utilisé 93 |
| 3.6.3 | Étapes de la validation physique 93 |
| 3.6.3.1 | Détermination du taux d'erreur binaire à la réception d'une ligne de transmission optique sans filtre 93 |
| 3.6.3.2 | Calibration des puissances de transmission maximales pour demeurer en régime linéaire 95 |
| 3.6.4 | Éléments du plan de contrôle et établissement d'une connexion 99 |
| 3.7 | Présentation du simulateur de plan de contrôle optique passif 102 |
| 3.7.1 | Vue du réseau 102 |
| 3.7.2 | Gestion des connexions 104 |
| 3.7.2.1 | Établissement des connexions et prise en compte du partage des ports 104 |
| 3.7.2.2 | Validation de la couche physique 105 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.7.2.3 | Maintien des connexions préalablement établies pour gestion des collisions..... | 106 |
| 3.7.3 | Gestion des trailed light-trees | 107 |
| 3.7.4 | Processus de capture de trace protocolaire | 108 |
| 3.8 | Conclusion | 109 |

CHAPITRE 4 VALIDATION DES CONCEPTS DU CONTRÔLE OPTIQUE SANS

| | | |
|---------|--|-----|
| | FILTRE | 111 |
| 4.1 | Définition d'une plate-forme optique sans filtre..... | 111 |
| 4.2 | Sélection d'une solution optique sans filtre optique | 115 |
| 4.2.1 | Différence avec les algorithmes RWA statiques | 115 |
| 4.2.2 | Validation du simulateur de plan de contrôle optique sans filtre..... | 117 |
| 4.2.2.1 | Rappel des stratégies du simulateur de plan de contrôle optique sans filtre | 117 |
| 4.2.2.2 | Gestion des collisions et de l'équilibrage de charge | 117 |
| 4.2.3 | Définition de la validation | 119 |
| 4.2.3.1 | Matrices utilisées | 120 |
| 4.2.3.2 | Définition des critères de performances pour la sélection des meilleures solutions topologiques issues de l'outil de design sans filtre..... | 121 |
| 4.2.3.3 | Définition des critères de performances pour les solutions optiques sans filtre | 121 |
| 4.3 | Résultats | 123 |
| 4.3.1 | Réseau allemand à sept nœuds..... | 123 |
| 4.3.1.1 | Présentation du réseau..... | 123 |
| 4.3.1.2 | Réponse à une matrice de trafic | 127 |
| 4.3.1.3 | Probabilité de blocage..... | 128 |
| 4.3.2 | Réseau italien à dix nœuds..... | 130 |
| 4.3.2.1 | Présentation du réseau..... | 130 |
| 4.3.2.2 | Réponse à une matrice de trafic | 132 |
| 4.3.2.3 | Probabilité de blocage..... | 133 |
| 4.3.3 | Réseau allemand à dix-sept nœuds | 134 |
| 4.3.3.1 | Réponse à une matrice de trafic | 136 |
| 4.3.3.2 | Probabilité de blocage..... | 137 |
| 4.3.4 | Analyse des résultats..... | 138 |
| 4.3.4.1 | Performances de cinquante sept solutions sans filtre pour le réseau allemand à sept nœuds..... | 138 |
| 4.3.4.2 | Sélection de la meilleure solution du réseau allemand à sept nœuds | 140 |
| 4.3.4.3 | Comparaison avec les solutions des travaux précédents..... | 141 |
| 4.3.4.4 | Performance de vingt deux solutions sans filtre pour le réseau italien à dix nœuds | 142 |
| 4.3.4.5 | Cas des réseaux à grand nombre de nœuds..... | 144 |
| 4.3.4.6 | Parallèle avec les réseaux optiques semi sans filtre..... | 145 |
| 4.3.5 | Généralisation de la méthode à un ensemble de réseaux | 146 |

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 5 ÉTUDE DES COÛTS ET DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE | 149 |
| 5.1 Règles de calcul des différents composants de chaque réseau | 150 |
| 5.1.1 Nombre de transpondeurs dans un réseau..... | 150 |
| 5.1.2 Nombre d'amplificateurs optiques dans un réseau | 151 |
| 5.1.3 Hypothèses sur la commutation | 152 |
| 5.2 Définition des règles de coût..... | 153 |
| 5.3 Détermination du nombre de connexions à partir duquel un réseau sans filtre possède un coût supérieur à un réseau optique actif..... | 154 |
| 5.4 Coût des composants..... | 154 |
| 5.5 Consommation électrique des composants | 155 |
| 5.6 Étude comparative des coûts et consommation électrique des solutions optiques sans filtre et active en fonction des six réseaux de références | 156 |
| 5.6.1 Cas du réseau allemand à sept nœuds | 156 |
| 5.6.1.1 Rappel des particularités du réseau..... | 156 |
| 5.6.1.2 Coût du réseau allemand à sept nœuds | 158 |
| 5.6.1.3 Consommation électrique du réseau allemand à sept nœuds... | 159 |
| 5.6.2 Cas du réseau italien à dix nœuds | 160 |
| 5.6.2.1 Rappel des particularités du réseau..... | 160 |
| 5.6.2.2 Coût du réseau italien à dix nœuds | 161 |
| 5.6.2.3 Consommation électrique du réseau italien à dix nœuds | 162 |
| 5.6.3 Cas du réseau allemand à dix-sept nœuds..... | 163 |
| 5.6.3.1 Rappel des particularités du réseau..... | 163 |
| 5.6.3.2 Coût du réseau allemand à dix-sept nœuds..... | 164 |
| 5.6.3.3 Consommation électrique du réseau allemand à dix-sept nœuds | 165 |
| 5.6.4 Généralisation à un ensemble de réseaux | 166 |
| 5.6.5 Consommation électrique de la couche physique et de la couche IP | 168 |
| CONCLUSION..... | 171 |
| RECOMMANDATIONS | 175 |
| ANNEXE I UNE MESURE DE LA CAPACITÉ MAXIMALE THÉORIQUE D'UN CANAL..... | 177 |
| ANNEXE II ALGORITHMES DU PLAN DE CONTRÔLE | 181 |
| ANNEXE III VALIDATION DU SIMULATEUR..... | 205 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 211 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--------------|--|
| Tableau 1.1 | Taux de pénétration de l'internet dans quatre pays7 |
| Tableau 2.1 | Dénombrement des topologies sans filtre possibles41 |
| Tableau 4.1 | Paramètre du réseau allemand à sept nœuds.....126 |
| Tableau 4.2 | Critères de performance d'une solution photonique active126 |
| Tableau 4.3 | Performances de solutions optiques sans filtre pour le réseau allemand à sept nœuds.....127 |
| Tableau 4.4 | Paramètres du réseau italien à dix nœuds131 |
| Tableau 4.5 | Critères de performance d'une solution photonique active131 |
| Tableau 4.6 | Performances de solutions optiques sans filtre pour le réseau italien à dix nœuds132 |
| Tableau 4.7 | Paramètres du réseau allemand à dix sept nœuds135 |
| Tableau 4.8 | Critères de performance d'une solution photonique active136 |
| Tableau 4.9 | Performances de solutions optiques sans filtre pour le réseau allemand à 17 nœuds137 |
| Tableau 4.10 | Comparaison des solutions sans filtre obtenues à partir de la figure 4.11 avec les solutions photoniques actives pour le réseau allemand à sept nœuds142 |
| Tableau 4.11 | Comparaison de la solution sans filtre obtenue à partir de la figure 4.14 avec les solutions photoniques actives pour le réseau italien à dix nœuds144 |
| Tableau 4.12 | Présentation des meilleures solutions sans filtre pour les six réseaux de référence proposés148 |
| Tableau 5.1 | Définition des symboles utilisés dans les calculs de coûts et de consommation électrique (5.2) et (5.3).....153 |
| Tableau 5.2 | Coût des composants optiques présentés en valeurs relatives par rapport au coût d'un transpondeur conventionnel à 10 Gbit/s.....155 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau 5.3 | Consommation électrique de chaque composant. Les valeurs sont relatives à la consommation d'un transpondeur 10 Gbit/s avec module de compensation électronique de la dispersion..... | 155 |
| Tableau 5.4 | Nombre de composants requis pour le réseau allemand à sept nœuds et pour 148 demandes de connexion..... | 157 |
| Tableau 5.5 | Coûts du réseau allemand à sept nœuds pour une solution optique sans filtre et une solution optique active..... | 158 |
| Tableau 5.6 | Consommation électrique du réseau allemand à sept nœuds pour une solution optique sans filtre et une solution optique active..... | 159 |
| Tableau 5.7 | Nombre de composants requis pour le réseau italien à dix nœuds et pour 90 demandes de connexion..... | 161 |
| Tableau 5.8 | Coûts du réseau italien pour les solutions optiques sans filtre et active ... | 161 |
| Tableau 5.9 | Consommation électrique du réseau italien à dix nœuds pour les solutions optiques sans filtre et active | 162 |
| Tableau 5.10 | Nombre de composants requis pour le réseau allemand à dix-sept nœuds et pour 272 demandes de connexions..... | 164 |
| Tableau 5.11 | Coûts du réseau allemand à dix-sept nœuds pour les solutions optiques sans filtre et active | 164 |
| Tableau 5.12 | Consommation électrique du réseau allemand à dix-sept nœuds pour les solutions optiques sans filtre et actives..... | 165 |
| Tableau 5.13 | Coût et consommation électrique des solutions optiques sans filtre et actives pour un ensemble de six réseaux | 167 |
| Tableau 5.14 | Consommation électrique des solutions optiques sans filtre et à commutation active par rapport à la consommation équivalente dans la couche réseau | 169 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|-------------|---|
| Figure 1.1 | Évolution du nombre d'adresses utilisées Tirée de l'Internet World Stat (2011).....8 |
| Figure 1.2 | Prévision du trafic internet en fonction des applications Tirée de Cisco (2011).....9 |
| Figure 1.3 | Capacité maximale d'un canal en fonction du nombre de sections..... 11 |
| Figure 1.4 | Exemple de réseau opaque..... 12 |
| Figure 1.5 | Un exemple de solution ROADM..... 13 |
| Figure 1.6 | Présentation d'un commutateur sélectif en longueur d'onde 15 |
| Figure 1.7 | Différence conceptuelle entre chemin optique et piste optique 16 |
| Figure 1.8 | Protocole de partage des ressources : analogie entre un PON (a) et une trace optique (b) 17 |
| Figure 1.9 | Classification des architectures, les feuilles sont des solutions de l'état de l'art 21 |
| Figure 2.1 | Exemple de réseau photonique actif Tirée de Tremblay, Gagnon et Châtelain (2006, p. 19)..... 28 |
| Figure 2.2 | Présentation d'un réseau optique sans filtre 29 |
| Figure 2.3 | Arbre optique passif sans filtre (à gauche) et architecture virtuelle ainsi réalisée (à droite)..... 32 |
| Figure 2.4 | Présentation d'une ligne de transmission photonique active (a) et sans filtre (b) Inspirée de Mantelet (2012, p. 5)..... 34 |
| Figure 2.5 | Description d'une architecture nodale photonique active 36 |
| Figure 2.6 | Description d'un nœud optique sans filtre..... 37 |
| Figure 2.7 | Deux configurations nodales possibles..... 40 |
| Figure 2.8: | Une solution topologique constituée d'arbres sans filtre, Tirée de Tremblay (2010, acétate 5) 41 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Figure 2.9 | Trois îlots séparés par des nœuds régénérateurs, Tirée de Enriquez (2010, p. 26)..... | 42 |
| Figure 2.10: | Assignation des longueurs d'onde sur une topologie envisagée Tirée de Tremblay, Gagnon et Châtelain (2006, p. 24) | 43 |
| Figure 2.11 | Différence entre un réseau optique sans filtre (a) et semi sans filtre (b), Tirée de Khanmohamadi (2011) | 45 |
| Figure 2.12: | Accumulation du bruit dans une combinaison passive, Tirée de Savoie (2010, p. 68)..... | 47 |
| Figure 2.13 | Présentation du concept de canal non filtré Tirée de Mantelet (2012) | 49 |
| Figure 2.14 | Réseau fonctionnel (a), et erreur de manipulation au nœud milieu de droite force l'apparition d'une boucle fermée (b)..... | 51 |
| Figure 2.15 | Situation d'interférence issue de plusieurs chemins recombinaés Tirée de Tremblay, Gagnon et Châtelain (2006, p.12) | 52 |
| Figure 2.16 : | Réseau fonctionnel (a), l'insertion d'un nœud mal configuré au centre a fait apparaître une boucle fermée (b) | 54 |
| Figure 2.17 | Insertion de contenu local passivement dans un <i>trailed light-tree</i> | 55 |
| Figure 2.18 | Réutilisation des longueurs d'onde dans un réseau optique sans filtre | 57 |
| Figure 2.19 | Spectre flexible Tirée de Lavallée (2011)..... | 58 |
| Figure 3.1 | Présentation du plan de contrôle Tirée de Mantelet (2012)..... | 66 |
| Figure 3.2 | Modèle de type inter-domaine pour les réseaux optiques sans filtre | 69 |
| Figure 3.3 | Interférences, boucles et collisions susceptibles de survenir sur le lien en pointillé dues à la combinaison des deux liens en gras..... | 72 |
| Figure 3.4 | Éléments de découverte de voisinage vers l'intérieur du nœud | 74 |
| Figure 3.5 | Concept de port en amont et de port en aval, Tirée de Mantelet (2012, p. 3)..... | 79 |
| Figure 3.6 | Algorithme en deux temps de parcours d'un arbre optique sans filtre pour déterminer les nœuds émetteurs en aval (en haut, phase 1) et en amont (en bas, phase 2)..... | 82 |
| Figure 3.7 | Exemple de détermination des ports émetteurs en amont et en aval | 88 |
| Figure 3.8 | Rappel d'une ligne de transmission optique sans filtre | 92 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure 3.9 | Puissance maximale par canal tolérée pour négliger la diffusion Raman stimulée (SRS) en fonction de la longueur de la ligne et de l'espacement inter canal..... | 97 |
| Figure 3.10 | Illustration des éléments du plan de contrôle..... | 100 |
| Figure 3.11 | Diagramme séquentiel de l'établissement d'une connexion optique sans filtre..... | 101 |
| Figure 3.12 | Présentation du simulateur..... | 103 |
| Figure 3.13 | Calcul d'une connexion entre Nuremberg et Berlin par le simulateur de plan de contrôle optique sans filtre | 104 |
| Figure 3.14 | Intégration du valideur de réseau optique sans filtre | 105 |
| Figure 3.15 | Maintien des paramètres physiques après la validation pendant l'établissement de la connexion..... | 106 |
| Figure 3.16 | Les connexions existantes sont répertoriées et maintenues par le simulateur pour gérer les risques de collisions ultérieures issues des nœuds émetteurs amont et aval | 107 |
| Figure 3.17 | Création d'un <i>trailed light-tree</i> | 108 |
| Figure 3.18 | Trace protocolaire simulant l'échange des requêtes dans le réseau..... | 109 |
| Figure 4.1: | Réalisation d'un réseau sans filtre au laboratoire de technologies de réseau Ciena. | 112 |
| Figure 4.2 | Schéma du mini-réseau sans filtre à sept nœuds..... | 114 |
| Figure 4.3 | Répartition des chemins optiques par une technique d'équilibrage de charge..... | 118 |
| Figure 4.4 | Topologie physique du réseau allemand à sept nœuds | 124 |
| Figure 4.5 | Présentation de six topologies candidates à trois arbres (a et b), à quatre (c), cinq (d), sept (e) et neuf (f) arbres..... | 125 |
| Figure 4.6 | Taux de blocage du réseau allemand à sept nœuds en fonction du nombre de demandes de connexion et des solutions sans filtre obtenues par l'outil de design sans filtre..... | 129 |
| Figure 4.7 | Topologie physique du réseau italien à dix nœuds | 130 |

| | |
|-------------|---|
| Figure 4.8 | Taux de blocage pour le réseau italien à 10 nœuds en fonction du nombre de demandes de connexion et des solutions obtenues à partir de l'outil de design sans filtre133 |
| Figure 4.9 | Topologie physique du réseau allemand à dix-sept nœuds.....135 |
| Figure 4.10 | Taux de blocage pour le réseau allemand à 17 nœuds en fonction du nombre de demandes de connexion et des solutions obtenues à partir de l'outil de design sans filtre138 |
| Figure 4.11 | Performances de cinquante sept solutions sans filtre pour le réseau allemand à sept nœuds139 |
| Figure 4.12 | Deux solutions sélectionnées pour le réseau allemand à sept nœuds141 |
| Figure 4.13 | Performances de 22 solutions pour le réseau italien à dix nœuds.....143 |
| Figure 4.14 | Sélection de la meilleure solution pour le réseau italien à dix nœuds143 |
| Figure 4.15 | Nombre de longueurs d'onde utilisées en fonction du nombre de filtres pour les réseaux allemand à sept nœuds (a), italien à dix nœuds (b), et allemand à 17 nœuds (c) Tirée de Khanmohamadi (2011, p.3).....146 |
| Figure 5.1 | Amplificateur de ligne d'une solution optique active (a) et sans filtre (b)152 |
| Figure 5.2 | Rappel de la topologie du réseau allemand à sept nœuds157 |
| Figure 5.3 | Rappel de la topologie du réseau italien à dix nœuds160 |
| Figure 5.4 | Rappel de la topologie du réseau allemand à dix-sept nœuds163 |

LISTE DES ALGORITHMES

| | Page |
|--|------|
| Algorithme 3.1 Procédé de veille à la découverte des interconnexions | 75 |
| Algorithme 3.2 Procédé d'installation d'un nouveau nœud | 76 |
| Algorithme 3.3 Retourner le port distant d'un lien optique | 83 |
| Algorithme 3.4 Retourner les ports émetteurs interconnectés | 84 |
| Algorithme 3.5 Retourner les ports récepteurs interconnectés | 85 |
| Algorithme 3.6 Retourner les ports émetteurs en aval et en amont | 86 |
| Algorithme 3.7 Routage par arbre optique sans filtre | 89 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-------|--|
| ASE | Amplified Spontaneous Emission |
| ASON | Automatically Switched Optical Network |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode |
| AWG | Arrayed Waveguide Gratings |
| BER | Binary Error Ratio |
| BW | Bandwidth |
| CAPEX | Capital Expenditure |
| CBCM | Compensation Budget Computation Module |
| CD | Chromatic Dispersion |
| CPL | Common Photonic Layer |
| CRS | Carrier Routing System |
| DCF | Dispersion Compensation Fiber |
| DCM | Dispersion Compensation Module |
| DQPSK | Differential Quadrature Phase-Shift Keying |
| DSP | Digital Signal Processing |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing |
| EDFA | Erbium-Doped Fiber Amplifier |
| E-NNI | External Network to Network Interface |
| ERO | Explicit Routing Object |
| FDOSC | Filterless Dual Optical Supervisory Client |
| FEC | Forward Error Correction |
| FLV | Filterless Link Validator |

| | |
|-------|---|
| FNDS | Filterless Network Design and Simulation tool |
| FTTH | Fiber to the Home |
| GMPLS | Generalized Multi-Protocol Label Switching |
| IM | Intensity Modulation |
| I-NNI | Internal Network to Network Interface |
| IP | Internet Protocol |
| ISP | Internet Service Provider |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LAN | Local Area Network |
| LCoS | Liquid Crystal on Silicon |
| LDB | Local Database |
| LDP | Label Distribution Protocol |
| LMP | Link Management Protocol |
| MAN | Metropolitan Area Network |
| MEMS | Micro Electro Mechanical System |
| MPCP | Multi-Point Control Protocol |
| NF | Noise Figure |
| NMS | Network Management System |
| NNI | Network to Network Interface |
| NSE | Non-Linear Schrödinger Equation |
| NTP | Network Time Protocol |
| OADM | Optical Add-Drop Multiplexer |
| OC | Optical Channel |

| | |
|----------|--|
| OCC | Optical Connection Controller |
| OLA | Optical Line Amplifier |
| OLT | Optical Line Terminal |
| ONT | Optical Network Terminal |
| OOK | On-Off Keying |
| OPEX | Operational Expenditure |
| OSC | Optical Supervisory Channel |
| OSPFE-TE | Open Shortest Path First – Traffic Engineering |
| OSNR | Optical Signal to Noise Ratio |
| OXC | Optical Cross-Connect |
| P2P | Point to Point |
| PCC | Path Computation Client |
| PCE | Path Computation Element |
| PCEP | Path Computation Element Protocol |
| PCS | Path Computation Solver |
| PLI | Physical Layer Impairments |
| PLIAR | Physical Layer Impairment Aware Routing |
| PNNI | Private Network to Network Interface |
| PON | Passive Optical network |
| PPD | Physical Parameters Database |
| PTP | Precision Time Protocol |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QoTS | Quality of Transmission Strategy |

| | |
|---------|---|
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| ROADM | Reconfigurable Add-Drop Multiplexer |
| RTT | Round-Trip Time |
| RSVP-TE | Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering |
| RWA | Routing and Wavelength Assignment |
| SBS | Stimulated Brillouin Scattering |
| SLA | Service Layer Agreement |
| SONET | Synchronous Optical Network |
| SRLG | Shared Risk Link Groups |
| SRS | Stimulated Raman Scattering |
| TDM | Time Division Multiplexing |
| TED | Traffic Engineering Database |
| ToS | Type of Service |
| TR | Tunable Receiver |
| TT | Tunable Transceiver |
| UNI | User to Network Interface |
| WAN | Wide Area Network |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing |
| WACS | Wavelength Assignment Computation Solver |
| WSS | Wavelength Selective Switch |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

| | |
|---|---|
| m | mètre (unité de longueur) |
| s | seconde (unité de temps) |
| V | volt (unité de différence de potentiel) |
| C | coulomb (quantité d'électricité) |

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

| | |
|---------------|------------|
| m | mètre |
| km | kilomètre |
| μm | micromètre |
| nm | nanomètre |

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesses

| | |
|--------------------|-----------------------|
| km.s^{-1} | kilomètre par seconde |
|--------------------|-----------------------|

Vitesses de groupe

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| $\text{ps}^2.\text{km}^{-1}$ | picoseconde par kilomètre |
|------------------------------|---------------------------|

Angles plan

| | |
|-----|--------|
| rad | radian |
|-----|--------|

UNITÉS DE TEMPS

Énergie, travail, quantité de chaleur

| | |
|----|-------------|
| mJ | milli joule |
|----|-------------|

| | |
|---|---------|
| s | seconde |
|---|---------|

| | |
|-----|--------|
| min | minute |
|-----|--------|

| | |
|---|-------|
| h | heure |
|---|-------|

| | |
|---|------|
| j | jour |
|---|------|

Fréquences

| | |
|----|-------|
| Hz | hertz |
|----|-------|

| | |
|-----|-----------|
| GHz | gigahertz |
|-----|-----------|

| | |
|-----|-----------|
| THz | terahertz |
|-----|-----------|

UNITÉS DE PUISSANCE

| | |
|---|------|
| W | watt |
|---|------|

| | |
|----|----------|
| kW | kilowatt |
|----|----------|

UNITÉS D'INTENSITÉ DU SIGNAL

| | |
|----|---------|
| dB | décibel |
|----|---------|

| | |
|---------------------|-----------------------|
| dB.km^{-1} | décibel par kilomètre |
|---------------------|-----------------------|

UNITÉS DE DÉBIT

| | |
|--------|---------------------|
| Mbit/s | megabit par seconde |
|--------|---------------------|

| | |
|--------|---------------------|
| Gbit/s | gigabit par seconde |
|--------|---------------------|

| | |
|--------|---------------------|
| Tbit/s | terabit par seconde |
|--------|---------------------|

INTRODUCTION

La continuelle émergence de concepts et d'applications Internet renouvelle sans cesse l'expérience que les utilisateurs ont de la toile, en plus de développer l'économie. La possibilité de se renseigner, puis d'échanger des documents de travail ou des œuvres (i.e. cinématographiques), de partager ses connaissances et ses aspirations gratuitement aide à l'émergence de nouveaux marchés. Heureusement, ces nouvelles applications se traduisent par des défis inédits qui bouleversent les façons de procéder traditionnelles. Par exemple, en termes de trafic généré, les données dépassant la voix consistent en des demandes de trafic hautement dynamiques (en « *burst* »), et en bout de ligne, difficilement prédictibles.

Pour soutenir cet essor exigeant, il est nécessaire d'œuvrer à de nombreux niveaux, comme déployer des applications logicielles, développer des architectures de routage efficaces ou encore, à notre niveau, définir des solutions de couche optique rapides et dynamiques supportant plusieurs types de contraintes supplémentaires (telles la flexibilité ou la simplicité de mise en œuvre, ou encore, si possible, l'efficacité écoénergétique).

Et, compétitivité rimant bien souvent avec un coût par bit par seconde le plus réduit possible, il est possible de jouer sur les points suivants :

- réduire l'empilement protocolaire, allant de pair avec un nombre d'octets d'en-tête grandissant, qui ne sont pas facturés à l'utilisateur. Ceci peut aussi éventuellement se traduire par un contrôle redondant, et donc des opérations superflues à faire effectuer à un processeur, d'où des temps de traitement plus élevés et un réchauffement inutile de la planète;
- augmenter l'efficacité spectrale sur le support de transport de l'information – par multiplexage ou par l'utilisation de formats de modulation performants – permettant de mutualiser au mieux les ressources tout en exploitant intelligemment le médium, ce que font avec brio les opérateurs historiques opérant sur des médiums tels la paire de cuivre torsadée, les câbles coaxiaux etc.;

- développer des solutions, des architectures et des topologies efficaces, moins onéreuses, ou entraînant moins de latence. Les applications de commerce à haute fréquence en sont particulièrement friandes puisqu'elles permettent de fluidifier les liquidités à la vitesse de la lumière dans la fibre optique, et les retombées pour les fournisseurs d'accès sont substantielles;
- faciliter la mise en œuvre de ces réseaux à l'aide de logiciels de planification dynamiques et automatisés permettant de rendre compte de la nature dynamique du trafic, afin de réduire les coûts associés à la maintenance.

L'apparition de ces familles d'applications émergentes se traduit par des trafics de comportement divers aux différentes couches de la pile protocolaire. Il est ainsi crucial que la couche physique soit la plus simple et la plus flexible possible à mettre en œuvre. Jusqu'à présent, les réseaux optiques basés sur des multiplexeurs optiques reconfigurable d'extraction et d'ajout de longueurs d'onde (ROADM) exploitant des commutateurs sélectifs en longueur d'onde (WSS) répondent bien à ces critères. Ils sont reconfigurables, notamment à l'aide d'un plan de contrôle qui peut les modifier automatiquement, et permettent des commutations avec une granularité à la longueur d'onde pour la plupart d'entre eux, c'est-à-dire que l'on peut modifier dynamiquement des canaux de plusieurs Gbit/s.

Les réseaux optiques sans filtre apparaissent comme une solution inédite aux réseaux de prochaine génération, car ils parviennent eux aussi à un tel niveau de simplification et de flexibilité. Brièvement, un réseau optique passif exploite les dernières avancées dans les télécommunications optiques, à savoir :

- l'usage de récepteurs cohérents et de lasers accordables,
- l'usage de dispositifs électroniques de compensation de la dispersion, supplantant ainsi la fibre à compensation de dispersion (DCF),
- l'exploitation de formats de modulation avancés robustes aux phénomènes physiques de distorsion liés à la fibre optique.

Ces mécanismes mis ensemble permettent de supprimer tout style de commutation intermédiaire comme effectué dans les réseaux photoniques actifs, déplaçant l'établissement des connections à la seule paire nœud émetteur/ nœud récepteur (et éventuellement tout nœud régénérateur), un concept analogue à la radio où il suffit simplement de syntoniser notre récepteur à la fréquence souhaitée pour recevoir le signal approprié. Nous verrons aussi que ce concept démultiplie les possibilités offertes par la couche optique, telles la capacité d'établir des pistes optiques (*light-trails*) ou la propriété d'insensibilité à la longueur d'onde (*gridless*). Ces possibilités amènent ultimement plus de versatilité à ces réseaux.

De fait, les réseaux optiques passifs se superposent aux réseaux maillés et se construisent comme des arbres passifs mettant bout à bout les liens entre nœuds connectés à l'aide de coupleurs de puissance optique passif, sortes d'équivalents aux réseaux optiques passifs (PON) employés pour la fibre à la maison (FTTH), cette fois ci à des réseaux centraux (*core networks*) nationaux (MAN) ou de plus large envergure (WAN). La suppression définitive de la commutation intermédiaire se traduit donc par une réduction substantielle des coûts et des procédures à mettre en œuvre pour établir les circuits optiques.

L'objectif principal de cette thèse est **d'établir une couche de contrôle, aussi appelée plan de contrôle**, adaptée aux réseaux optiques sans filtre et **d'en valider les concepts** par des simulations rattachées à des réseaux de référence nationaux et régionaux.

Comme des algorithmes de conception et de validation de tels réseaux ont déjà été proposés par des travaux antérieurs (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006, note interne), (Archambault, 2008), (Savoie, 2010) et (Enriquez, 2010), cette thèse se fonde sur leurs résultats et ambitionne de développer de nouvelles métriques de sélection des meilleures solutions sans filtre, dans un concept de réseaux en évolution (*pay-as-you-grow*) où les demandes de connexion s'ajoutent au fur et à mesure du temps.

Dans le même temps, des études sont effectuées à l'Institut Royal de Technologie KTH de Stockholm, en Suède, et dont le but est le placement optimal du plus petit nombre de filtres

passifs dans un réseau, dans le but de diminuer le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour répondre à une matrice de trafic donnée (Khanmohamadi, 2011). Il s'agit d'un aspect important qui devrait permettre dans la foulée de réduire le nombre de canaux non filtrés, comme nous les présentons par la suite.

Enfin, des travaux sont en cours (Cassidy, 2012) visant à présenter un prototype de simulation des réseaux optiques sans filtre, et dans lequel tout ou partie des concepts évoqués dans cette thèse pourrait être incorporé dans un plan de contrôle préparé à cet effet.

Dans cette optique, nous débutons par le premier chapitre faisant une description de l'Internet aujourd'hui et des défis qu'il pose dès maintenant sur les réseaux optiques dits de future (ou prochaine) génération. Nous y voyons aussi l'état de l'art en termes d'architectures photoniques actives, mais aussi des techniques et concepts employés dans les plans de contrôle.

Le chapitre deux est consacré à la présentation des réseaux optiques sans filtre et leur placement vis-à-vis des réseaux photoniques actifs. Nous en présentons les tenants définis par des travaux antérieurs, ainsi que des avantages tels que la simplicité de mise en œuvre et de déploiement sur des structures actuelles, mais aussi des contraintes inhérentes au concept même de solution sans filtre (telles les problématiques de boucles laser, de risques d'interférences et de canaux non filtrés etc.).

De cette description, le chapitre trois démontre l'exploitation des caractéristiques des réseaux optiques sans filtre dans le plan de contrôle. On y voit que des solutions de l'état de l'art – reposant par exemple sur l'usage d'élément de calcul du chemin (PCE), de modules de gestion du canal de contrôle (OSC), ou encore l'emploi de protocoles de contrôle – sont en mesure de fonctionner simplement si elles intègrent les contraintes des réseaux optiques passifs. Nous présentons donc le bilan des caractéristiques propres à ces réseaux et évaluons s'il est nécessaire d'envisager des extensions à des standards existants.

Le chapitre quatre conclut par la validation des concepts évoqués dans les deux chapitres précédents, et sert de cadre à la description d'un montage en laboratoire ainsi que d'un simulateur de plan de contrôle sans filtre permettant d'employer une métrique utile pour sélectionner une solution optimisée de topologie sans filtre proposée par les travaux antérieurs, parmi un ensemble de solutions obtenues à l'aide des outils de conception développés dans les travaux antérieurs (Archambault, 2008), (Savoie, 2010) et (Enriquez, 2010).

Pour conclure, le succès d'Internet se traduit aussi par une hausse de la consommation électrique, notamment au niveau de la couche réseau. Nous montrons ainsi au chapitre cinq combien la solution retenue est efficace en termes de coûts et de consommation électrique.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATION

1.1 Le succès d'Internet

Internet, en l'espace d'une génération, a su faire partie intégrante de notre vie de tous les jours, au point que nous l'utilisons quotidiennement pour des activités devenues somme toute habituelles. En témoigne le tableau 1.1, du moins pour les trois pays industrialisés mentionnés, environ une personne sur deux se connecte sur la toile une à deux heures par jour environ. Parmi ces personnes connectées, la grande majorité (par exemple 97% d'entre elles au Canada en 2007) effectue de la recherche en ligne, ou de la correspondance.

Tableau 1.1 Taux de pénétration de l'internet dans quatre pays

| Pays | Taux de pénétration | Recherche en ligne | Échange de courriels | Opérations financières | Messagerie instantanée | Réseaux sociaux | Regarder de la vidéo |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Canada (2007) | 73.2% | 97% | 93% | 75% | 50% | 20% | 20% |
| Etats-Unis (2010) | 77.3% | 87% | 94% | 75% | 47% | 61% | 66% |
| France (2010) | 64% | 82.6% | 91.1% | 65.6% | -- | 41.1% | -- |
| Chine (2010) | 31.8% | 76.3% | 56.5% | 30.5% | 72.4% | 50.1% | 63.2% |

Les données de ce tableau ont été compilées depuis Middleton (2010, p. 15), de l'organisme China Internet Network Information Center (2010, p. 28), de l'Institut national de la

statistique et des études économiques (INSEE, 2010) et du bureau américain du recensement (U.S. Census Bureau, 2011).

La figure 1.1 présente ainsi l'évolution du nombre d'adresses IP dans le réseau mondial depuis ces 20 dernières années, chacune de ces adresses étant susceptible de générer du trafic. On remarque notamment que la croissance est entretenue, et suit une tendance qui peut se poursuivre encore quelques temps. En effet, les voitures, la domotique, et la téléphonie sans fil en général sont particulièrement susceptibles de fournir de nouveaux composants connectés sur la toile.

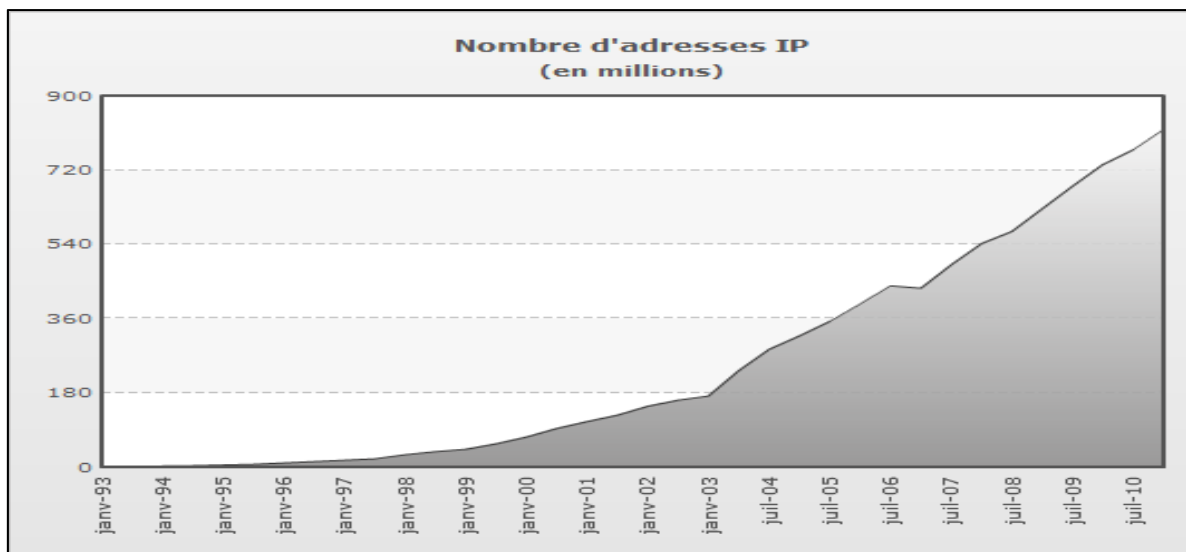


Figure 1.1 Évolution du nombre d'adresses utilisées
Tirée de l'Internet World Stat (2011)

Ce succès fulgurant de l'Internet s'est traduit cette année par le franchissement symbolique des deux milliards d'utilisateurs avec une croissance actuelle d'environ sept millions d'adresses par mois (Duncan, 2011). Il en résulte de cette croissance rapide une consommation de bande passante sans cesse plus grande créée sur trois mécanismes motrices :

- d'une part, l'entrée en jeu récente des pays émergents amène un nombre d'utilisateurs considérable, la croissance en dix ans du nombre d'utilisateurs a ainsi varié de 706.9% à

- 2527.4% selon les régions (Duncan, 2011). Ces pays ainsi présentant un taux de pénétration encore faible (11.4% à 36.2%), mais rattrapent rapidement leur retard;
- d'autre part, la multiplication des types d'applications en ligne, récemment sur téléphones intelligents, ne cessent de créer des besoins en termes de bande passante et de serveurs connectés sur la toile;
 - enfin, la pression exercée par la concurrence au niveau des fournisseurs d'accès implique que les usagers se voient bénéficier d'un accès à l'Internet toujours plus rapide.

Il en découle ainsi de la figure 1.2 une prédiction (Cisco, 2011) que le trafic internet global va atteindre en 2015 le quadruple de ce qu'il était en 2010, soit une croissance annuelle d'environ 32%.

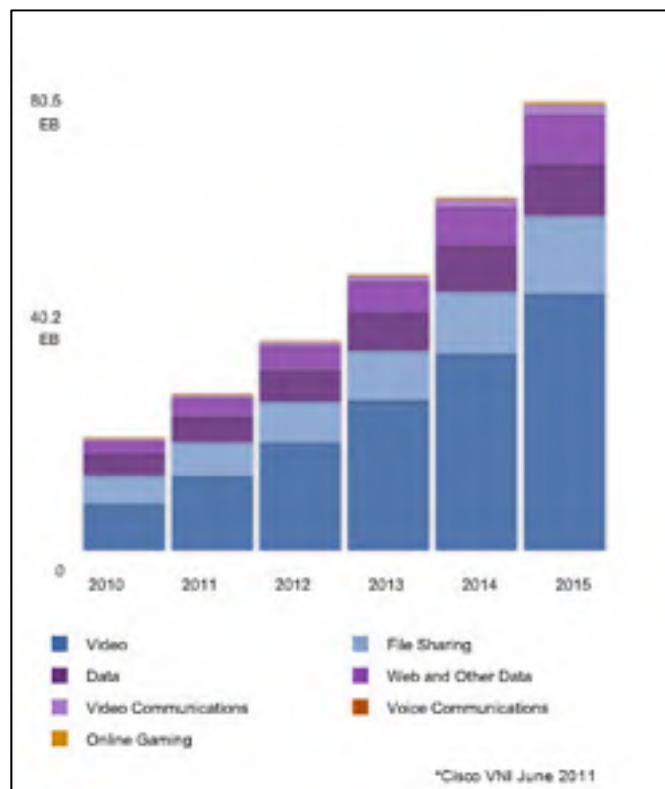


Figure 1.2 Prédiction du trafic internet en fonction des applications
Tirée de Cisco (2011)

1.2 Le potentiel de la fibre optique

Dédiés majoritairement au transport de la voix il y a encore dix ans, les réseaux de télécommunications d'aujourd'hui doivent faire face à présent à de nouvelles « *killer applications* » particulièrement gourmandes en termes de ressources, et présentant des profils particuliers (i.e. latence, fiabilité exigées), et se traduisant par une croissance de la complexité.

Un environnement dans lequel le trafic augmente à croissance soutenue motive ainsi le déploiement et la mise à jour de réseaux à plus hauts débits (i.e. depuis 2006, plus de 14 Tbit/s réalisés dans une seule fibre optique (NTT, 2006)) exploitant tout le potentiel de la fibre optique. Chacune des techniques suivantes peut se traduire potentiellement par une diminution du coût par bit par seconde :

- le multiplexage temporel (*Time Domain Multiplexing*, TDM), en haussant le débit par canal,
- le multiplexage en longueurs d'onde simple (*Wavelength Domain Multiplexing*, WDM), ou dense (DWDM), permettant de paralléliser les transmissions sur plusieurs canaux dans une même fibre optique, celle-ci supportant théoriquement une bande de 50 THz (Sahasrabudde et Mukherjee, 1999),
- éventuellement, le multiplexage en polarisation, en profitant des deux modes de propagation orthogonaux dans la fibre optique,
- le multiplexage spatial, dans les fibres optiques à plusieurs cœurs (Goell et Roanoke, 1976),
- enfin, l'exploration de techniques de modulation avancées d'abord ignorées pour des raisons de coût (Roberts et *al.*, 2011).

Il est possible par tous ces moyens de déduire la capacité maximale de la fibre optique à partir de la théorie de l'information (Tang, 2007), comme montré dans l'Annexe I. La figure 1.3 nous montre l'efficacité spectrale de chaque canal optique en fonction de la portée des

transmissions – chaque section mesurant 80 km de long – et présente aussi l'état de nos capacités commerciales actuelles, en 2012, par un point.

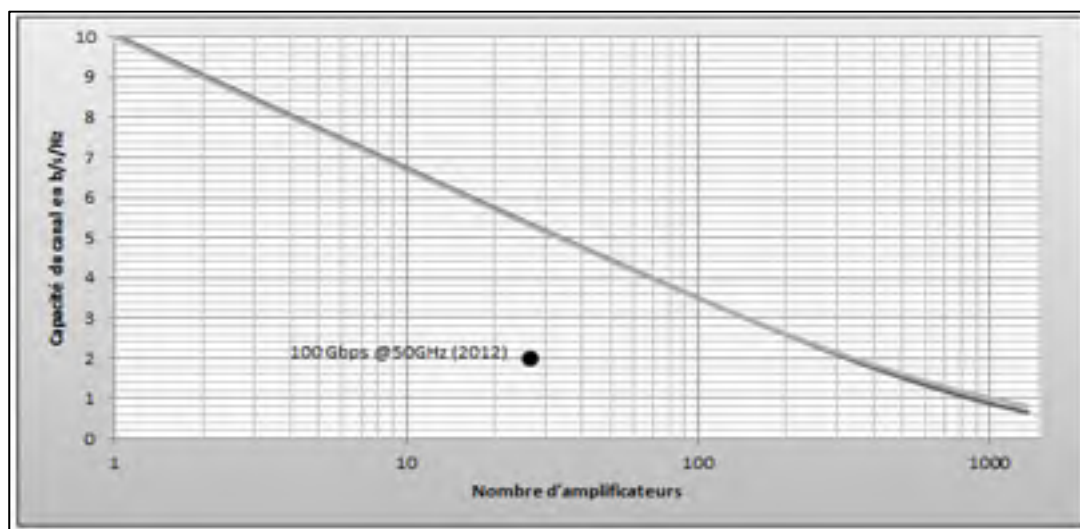


Figure 1.3 Capacité maximale d'un canal en fonction du nombre de sections (cf. Annexe I)

On voit par exemple qu'aujourd'hui, il est possible de réaliser une efficacité spectrale optique de deux bits par seconde et par Hertz, ce qui correspond, pour une largeur de canal de 50 GHz à 100 Gbit/s. Par exemple, (Lightwave Online, 2011) les portées des transmissions commerciales atteignent 2000 km, alors qu'en théorie, elles pourraient être encore plus longues.

1.3 Développement de solutions flexibles

Nous venons de voir l'extraordinaire potentiel de la fibre optique pour encaisser la hausse de la demande en bande passante que ne manqueront pas de susciter de nouvelles applications à venir. Toutefois, l'efficacité de l'emploi d'une architecture est cruciale pour exploiter convenablement tout ce potentiel.

1.3.1 Réseaux opaques

Par exemple, la toute première génération de réseaux optiques reposait sur le principe de la régénération électrique du signal à chaque nœud traversé. Le signal reçu par une interface (voir figure 1.4) est converti au format électrique dans le *backplane* où il subit une régénération, c'est-à-dire, une réamplification, une remise en forme ainsi qu'une resynchronisation (3R), avant sa reconversion au format optique.

Ces réseaux dits opaques, dans lesquels tous les nœuds disposent de régénérateurs, possèdent une granularité de commutation très fine jusqu'à la tranche de temps (*time slots*), ainsi qu'une gestion intrinsèque de la qualité du signal, quoique leur limite, due à la vitesse des semi conducteurs, les rend plus dispendieux à débit élevé et provoque ainsi leur effacement progressif.

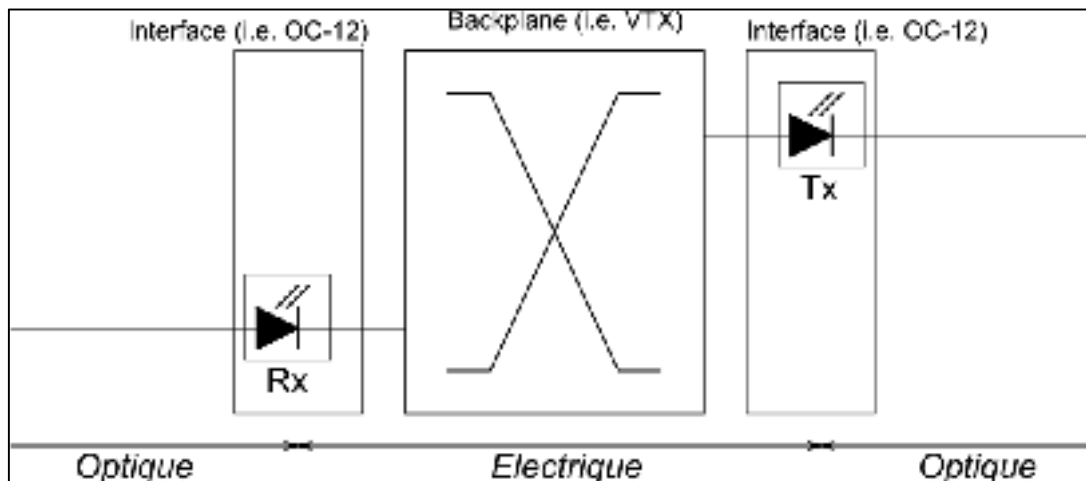


Figure 1.4 Exemple de réseau opaque

1.3.2 Réseaux transparents

Les générations ultérieures ont amené plus de flexibilité en ce sens que les connexions optiques ne sont pas nécessairement des successions de liaisons point-à-point (*point to point*, P2P) (Ramaswami et Sivarajan, 2002). Elles ont capitalisé sur des structures d'insertion et

d'extraction de longueurs d'onde (*Optical Add-drop Multiplexer*, OADM) potentiellement reconfigurables (ROADM), avec possibilité de laisser circuler un signal optique sans le convertir si l'accumulation des distorsions n'est pas trop prononcée pour détruire sa qualité.

Par exemple, la figure 1.5 introduit un étage supplémentaire de composants optiques, composé par exemple de commutateurs sélectifs en longueur d'onde (WSS, voir section suivante) permettant, soit de convoier les signaux vers un traitement similaire à celui de la figure 1.4, soit de passer à travers le nœud en demeurant au format optique, rendant ainsi les réseaux transparents.

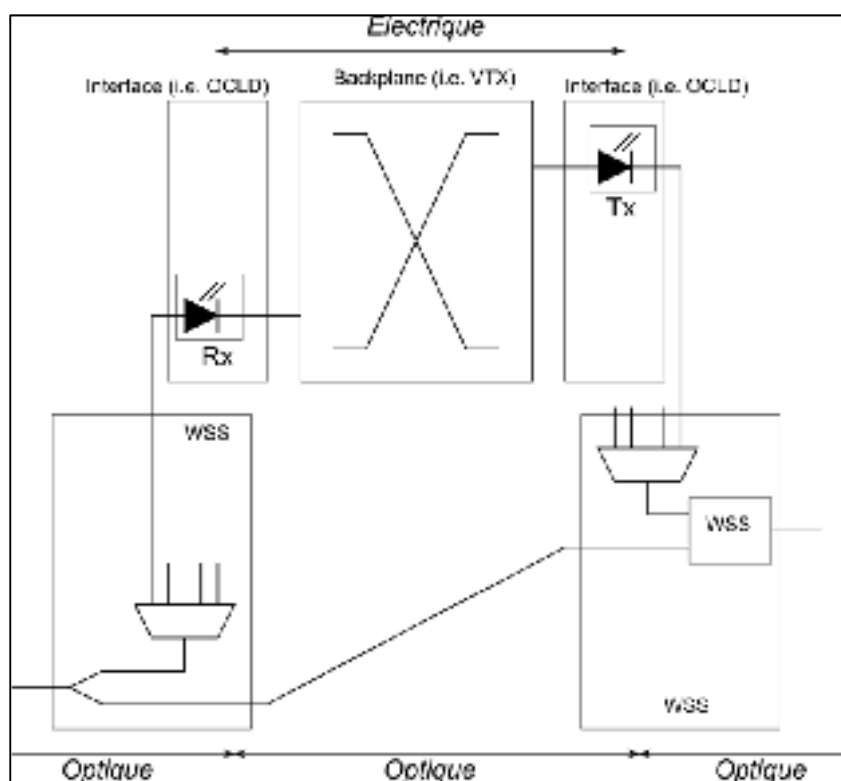


Figure 1.5 Un exemple de solution ROADM

Il est dès lors possible de faire du routage et de l'assignation de longueurs d'onde (RWA) dans une topologie maillée reconfigurable. Cette reconfigurabilité aide de plus à rendre le réseau tolérant aux fautes et à l'évolution des besoins en bande passante. Il est possible aussi

d'introduire le concept de groupage de trafic (ou *traffic grooming*) de façon à permettre à plusieurs flux des couches supérieures de mutualiser une connexion optique, ce qui permet de réduire le gaspillage des ressources physiques.

1.3.3 Définition d'un commutateur sélectif en longueur d'onde

Un commutateur optique sélectif en longueur d'onde ou WSS est un composant actif et reconfigurable qui permet la commutation d'un signal d'un de ses ports à un autre, compte tenu de la longueur d'onde de la porteuse optique modulée par ce signal. Le dispositif de commutation repose soit sur des systèmes micro électro mécaniques (MEMS) ou encore sur les cristaux liquides (LCoS).

Cette sélectivité de la longueur d'onde est établie à l'aide d'un multiplexeur et d'un démultiplexeur en longueurs d'onde, qui peut être réalisé à l'aide de guides d'onde disposés en treillis (*arrayed waveguide gratings*, AWG). Les WSS permettent ainsi la commutation d'un signal entrant vers un des ports de sortie du nœud, ou permettent l'ajout et l'extraction locale du signal.

La figure 1.6 présente un exemple de WSS. Deux longueurs d'onde rouge et verte sont tout d'abord démultiplexées de façon à être traitées séparément par le commutateur. Celui-ci choisit de laisser passer le signal rouge sur son port de sortie où il est d'abord multiplexé, ou extrait le signal vert et le commute vers le port d'extraction locale (en bas).

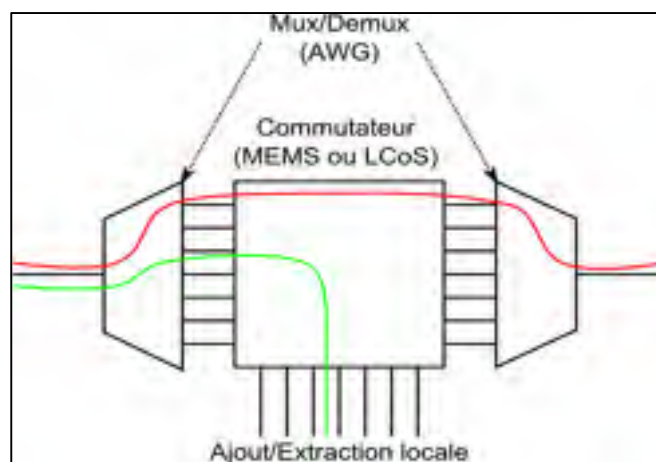


Figure 1.6 Présentation d'un commutateur sélectif en longueur d'onde

1.3.4 Présentation des pistes optiques

Une simple façon de faire consiste à créer une ressource exclusive (i.e. une porteuse optique) entre une paire de nœuds émetteur et récepteur lors de l'établissement d'une connexion : un chemin optique (*lightpath*).

Plus récemment, ce principe a été étendu au concept de piste optique ou *light-trail* (Gumaste *et al.*, 2004). Une piste optique constitue ainsi un bus optique où les nœuds intermédiaires peuvent obtenir un accès à une porteuse optique donnée, c'est-à-dire que nonobstant un protocole de synchronisation donné, du multiplexage temporel peut être effectué entre divers nœuds sur un chemin optique, d'où un surcroît potentiel d'efficacité.

Si l'on appelle collision de longueur d'onde la situation où deux instances d'une même longueur d'onde transitent sur un même lien optique (Cao *et al.*, 2009), alors deux chemins optiques qui ne sont pas disjoints doivent utiliser deux longueurs d'onde différentes pour éviter ces collisions. En revanche, il est possible qu'une piste optique concatène plusieurs connexions sur une même longueur d'onde.

La figure 1.7 illustre cette différence de concept (Fang et Somani, 2004). L'usage exclusif d'un chemin optique pousse à éviter une collision. Par exemple, en (a), le nœud A gère deux chemins optiques rouge et vert pour deux destinataires différents, respectivement B et D. Chacun des deux canaux devra donc utiliser une longueur d'onde différente pour éviter toute collision, notamment avec la connexion entre C et D.

Si les transmissions issues des couches supérieures ont un débit inférieur à celui des lasers offerts par A, alors, nous constatons que des ressources sont perdues. Imaginons le cas de figure suivant :

- les lasers ont un débit de 10 Gbit/s,
- les connexions véhiculent chacune un signal Ethernet à 1 Gbit/s.

L'usage exclusif d'un chemin optique est remplacé par le concept du bus optique de la figure 1.7, en (b), où une seule longueur d'onde est employée par A et par C pour joindre B et D pour grouper leurs transmissions. Dans ce cas de figure, en effet, les 10 Gbit/s offerts par la couche optique ont été partagés par les trois transmissions Ethernet à 1 Gbit/s. Une trace optique permet une réduction du nombre de longueurs d'onde convoyées dans la fibre optique (Ye, Wosner et Chlamtac, 2006).

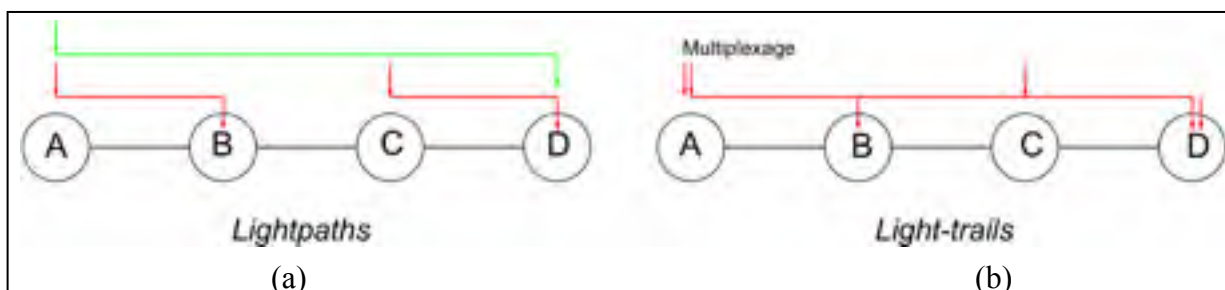


Figure 1.7 Différence conceptuelle entre chemin optique et piste optique

Le partage des longueurs d'onde peut se faire par une approche analogue aux réseaux optiques passifs (PON), mais portée à 1500 km avec plusieurs longueurs d'onde, c'est-à-dire par un protocole qui permet à chaque nœud de posséder une tranche de temps exclusive pour transmettre sur une piste optique (Gumaste et al., 2009), ou par le moyen du protocole de contrôle multi point (MPCP).

La figure 1.8 illustre ce principe. En (a), le terminal optique d'un PON (OLT) sert de maître pour assigner des tranches de temps à chaque unité de réseau (ONT) de façon à prévenir toute collision dans le sens montant des connexions (*upstream*), (Gaglianello, 2012). Pareille approche pourrait être implémentée avec les traces optiques (en b) pour peu qu'un nœud soit déclaré (i.e. administrativement), maître d'une trace.

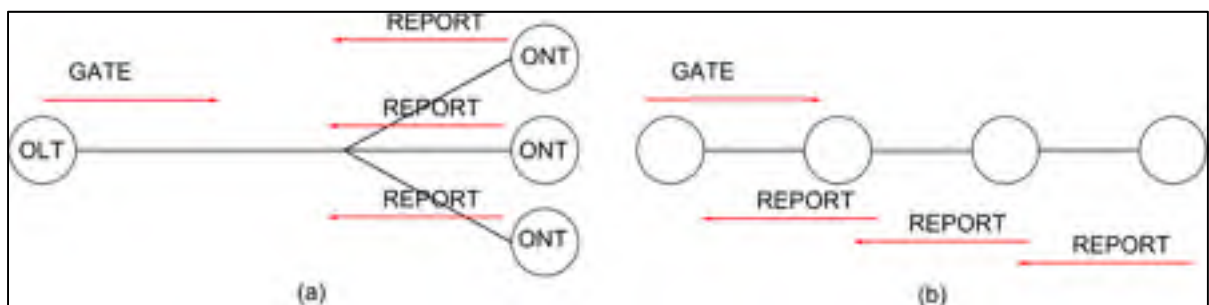


Figure 1.8 Protocole de partage des ressources : analogie entre un PON (a) et une trace optique (b)

La synchronisation nécessaire entre les nœuds peut être effectuée à l'aide d'un protocole ou d'un mécanisme de synchronisation horaire, tel :

- le protocole de synchronisation horaire par réseau (NTP),
- le protocole de temps avec précision (PTP),
- un système de récepteurs GPS (*on-board* GPS).

1.4 Plans de contrôle

Un autre moyen d'exploiter l'immense potentiel de la fibre optique, outre l'emploi d'architectures de réseaux efficaces, consiste à déléguer les procédures de gestion des ressources à un plan de contrôle.

Un plan de contrôle est un ensemble de composants implémentant une suite de protocoles de communication permettant l'échange d'informations topologiques et de connectivité en vue

de produire les meilleures routes possibles lors de la demande d'une connexion, ainsi que l'asservissement et le contrôle des diverses unités permettant la création physique des connexions. Le plan de contrôle a ainsi pour but d'effectuer l'inventaire complet des ressources disponibles ainsi que la gestion et le contrôle des connexions établies et permet l'automatisation et l'optimisation rapide de tâches fastidieuses pour l'être humain.

L'automatisation de la création des circuits, comme par exemple dans le cas des réseaux optiques automatiquement commutés (ASON), est ainsi censée amener de la simplicité d'opération, de la reconfigurabilité, une fiabilité accrue, et ouvre la possibilité de temps d'établissement des connexions de l'ordre du jour (Nederlof *et al.*, 2001) à l'ordre de la minute (Agraz *et al.*, 2010), en plus d'augmenter l'efficacité des solutions, donc de réduire le coût par bit par seconde (Jajszczyk, 2004).

1.4.1 Les fonctions des plans de contrôle

Un plan de contrôle intelligent et automatique permet l'amélioration de l'exploitation d'un réseau, c'est-à-dire de le rendre plus efficace, plus dynamique (souplesse et évolutivité), et donc ultimement, de diminuer son coût d'opération (*Operational Expenditure*, OPEX). Les fonctionnalités sont les suivantes (Ciena, 2012) et (Mukherjee, 2006) :

- auto-découverte, le réseau doit par lui-même être en mesure de maintenir une vue précise de lui-même, de faire la liste complète de ses ressources, et d'en déterminer la disponibilité;
- auto-provisionnement, selon notamment un concept de *point and click*. L'être humain devrait pouvoir sélectionner le nœud source, le nœud émetteur, le débit du trafic qu'il veut établir en plus de quelques contraintes, et laisser le plan de contrôle calculer le meilleur chemin en fonction des disponibilités, des métriques de ses algorithmes de routage et des contraintes précédemment évoquées, et établir lui-même la connexion (mobiliser ses ressources);

- auto-restauration, le réseau doit être en mesure de faire face à la survenue d'une ou de plusieurs pannes simultanées et successives, par exemple en redirigeant les signaux victimes de la dite panne;
- aussi, on peut ajouter le concept d'auto-planification, où la maintenance demande à ce que le plan de contrôle redirige temporairement des signaux transitant sur une section du réseau où elle va opérer.

Par ailleurs, un plan de contrôle optique doit spécifiquement prendre en compte les effets de distorsion du medium optique, surtout aux débits supérieurs à 10 Gbit/s, par exemple dans le concept de routage avec prise en compte des distorsions de la couche physique (*Physical Layer Impairment Aware Routing*, PLIAR) de façon à ce que le plan de contrôle puisse assigner une longueur d'onde appropriée (Saradhi et Subramian, 2009) et ne tente pas tout simplement d'établir une connexion invalide en termes de taux d'erreur binaire (*Bit Error Rate*, BER). Dans le cas contraire, la connexion serait inappropriée vis-à-vis de la politique ou du type de service (*Type of Service*, ToS).

1.4.2 Grandes familles de protocoles de contrôle

Le protocole *Generalized Multi-Protocol Label Switching* (GMPLS) est une famille de protocoles de contrôle basé sur IP dont l'avantage majeur est son indépendance aux protocoles des différents opérateurs. Elle permet de faire aussi bien du multiplexage temporel et de longueur d'onde. L'ajout d'un label permettant de gérer de manière transparente ces concepts est un autre atout puisque la quantité de données ajoutées est faible (un label MPLS consiste en effet en 32 bits).

GMPLS repose sur une gamme de protocoles dont:

- User to Network Interface (UNI) permet d'établir des connexions bout à bout (*end to end*) à travers les réseaux de plusieurs opérateurs (OIF Forum, 2008). Il s'agit donc d'un protocole fondamental pour l'interopérabilité;

- Open Shortest Path First (OSPF-TE), un protocole de routage à état de liens, permettant par exemple de convoyer des données importantes comme la charge du lien etc. et effectuant en outre une découverte du voisinage de l'adjacence et des ressources (notamment à l'aide de *Hello*) (Katz et *al.*, 2003);
- Resource Reservation Protocol (RSVP-TE), est un protocole de signalisation utile pour la création et le relâchement de connexions (Farel, Ayyangar et Vasseur, 2008);
- Link Management Protocol (LMP) permet d'effectuer la gestion des liens, comme la détection de connectivité, la détection de bris etc. (Lang, 2005), LMP-WDM est par exemple utile dans le cas des solutions optiques à commutation active où le WSS peut communiquer avec les transpondeurs connectés à l'un de ses ports, pour aider notamment au déverminage;
- Label Distribution Protocol (LDP) étant dépréciée en faveur de RSVP-TE, on ne le considérera pas ici.

Private Network to Network Interface (P-NNI) est le concurrent de GMPLS employé sur les réseaux de type ATM, donc potentiellement préférentiellement en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord. De la même manière que pour GMPLS, P-NNI est un ensemble de protocoles permettant surtout de constituer une base de données d'un réseau ATM (Cisco, 2005).

1.4.3 Architectures de plan de contrôle

La figure 1.9 présente les solutions rencontrées dans l'état de l'art. Il s'agit d'une classification, qui, selon la façon dont le routage et la signalisation sont effectués, produit des solutions différentes. Dans le chapitre quatre, nous déterminerons une architecture particulière à proposer pour les réseaux optiques sans filtre. Nous en décrivons les points les plus importants dans le reste de cette section.

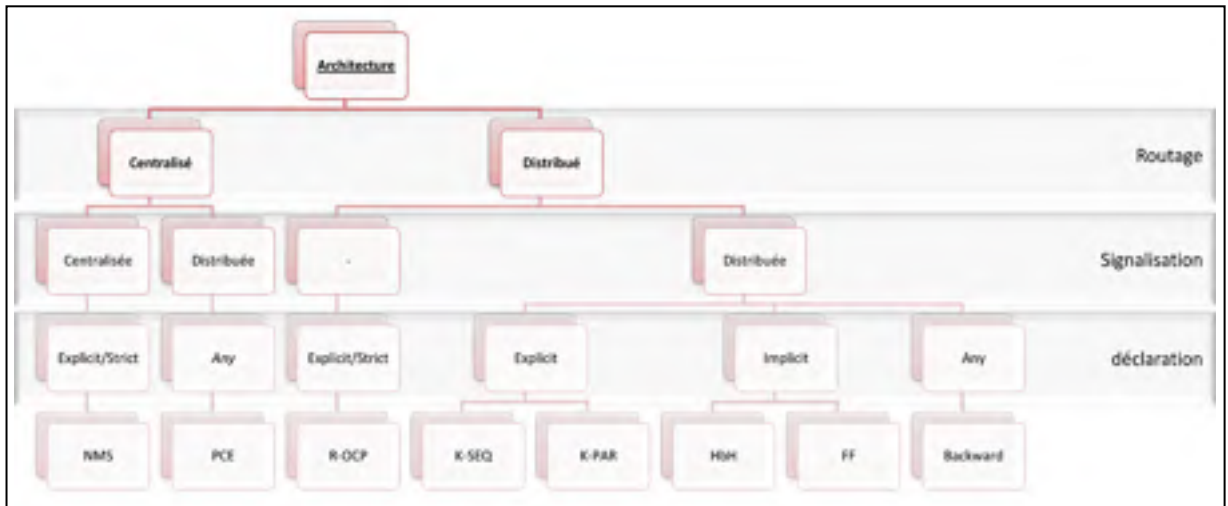


Figure 1.9 Classification des architectures, les feuilles sont des solutions de l'état de l'art.
Adaptée de Salvadori et *al.* (2009)

Ainsi, trois grandes familles d'architectures de plan de contrôle permettent d'aboutir aux différentes fonctions décrites, ceci avec des forces et des faiblesses (Salvadori et *al.*, 2009):

- si l'on confie la signalisation et le routage à un composant seul, alors on obtient une architecture centralisée;
- on peut distribuer la stratégie de signalisation pour l'établissement du canal (soit la signalisation), mais demander à un seul composant d'effectuer le routage. Ceci par exemple permettrait à ce composant d'avoir à connaître les particularités physiques du réseau. Dépendamment des sources, l'architecture est considérée comme centralisée ou hybride (Ramamurthy, Sudipta et Chaudhuri, 2001);
- enfin, dans le cadre d'une signalisation et d'un routage distribués, on peut conférer les procédures de routage aux nœuds émetteurs (*ingress node*) ou inclure les nœuds intermédiaires dans le processus du routage et de l'établissement du chemin.

Tout d'abord, une architecture centralisée repose sur un composant central (tel un système de gestion du réseau, NMS, ou un élément de calcul du chemin, PCE, cf. figure 1.9) et se base sur la connaissance intégrale du statut du réseau, en temps réel, ainsi que sa performance, et l'optimisation des ressources le rend optimal dans l'approvisionnement dynamique du

réseau, depuis le routage jusqu'à la signalisation (c'est-à-dire la configuration des éléments). Par ailleurs, il est efficace dans la gestion des alarmes.

Toutefois, on peut noter une limitation dans la capacité à la mise à l'échelle (*scalability*), dans le nombre de nœud, le nombre de sous réseaux, la variabilité des vendeurs (interopérabilité), les types de trafics, l'ingénierie de trafic... car ceci se traduit par une lenteur et une gourmandise en termes de processeurs pour gérer par exemple les problèmes de distorsion liés à la couche physique (PLI) et les problèmes NP-complets associés au problème RWA.

Enfin on peut noter qu'il s'agit d'un élément sensible vis-à-vis des risques de faute (*single point of failure*) et que sa base de donnée ne doit surtout pas être corrompue.

Par ailleurs, un élément de calcul de chemin (PCE) tel que décrit précédemment, peut être employé de manière centralisée ou encore en utilisant plusieurs par réseau, et n'est rien de plus qu'une entité quelconque qui dispose de ressources computationnelle (i.e. un CPU) à même de calculer, connaissant la topologie et les informations du réseau, un chemin lors de la réception d'une requête émise par un client (appelé PCC), et à renvoyer le résultat au requérant (Farel, Vasseur et Ash, 2006). Un PCE est séduisant pour aider à intégrer des spécificités propres à un type de réseau sans passer par une extension des protocoles et procédures existantes (Castoldi et *al.*, 2007).

De ce fait, cette entité dispose d'une adjacence avec au moins un des nœuds du réseau. On en déduit qu'il peut donc s'agir :

- d'un serveur dédié au calcul, distinct des nœuds, on parle dès lors de solution externe,
- d'un nœud du réseau qui est augmenté des fonctions de calcul, il s'agit alors d'une solution composite,
- dans le cas d'un réseau optique sans filtre, le PCE peut être placé à la racine d'un arbre.

Cette solution peut être considérée comme hybride, dans la mesure où le plan de contrôle optique (OCP) gagne une partie des fonctionnalités propres à une architecture distribuée, et les nœuds peuvent faire une requête de calcul de chemin au PCE.

Le plan de contrôle peut aussi effectuer par lui-même le routage de manière distribuée, c'est-à-dire que tous les nœuds font le calcul du routage (Salvadori et *al.*, 2007). Le protocole OPSF-TE doit donc être étendu afin de prendre en compte les PLI. La connaissance de l'intégralité du réseau est connue de chaque nœud, on s'expose donc à une forte charge dans le plan de contrôle, à un risque de mauvaise appréciation, en cas de divergence sur l'information contenue dans les bases de données, liée par exemple à un établissement concurrentiel de connexions.

Le plan de contrôle peut enfin effectuer une signalisation distribuée et fondée sur des bases de données d'ingénierie de trafic (TED) partiellement peuplées, mais à constamment maintenir à jour, ceci pour pouvoir obtenir une estimation de la qualité d'un signal lors de l'établissement d'une connexion. De ce fait, (Salvadori et *al.*, 2009), on peut trouver plusieurs variantes cherchant à optimiser les performances, selon le type de réseau envisagé :

- si le calcul repose séquentiellement sur K chemins (K-SEQ, cf. figure 1.9), successivement, le nœud source va tenter de réserver la longueur d'onde du chemin à établir en partant de la meilleure qualité. C'est un protocole vers l'aval à agressivité moyenne, très équilibré en termes de latence, de probabilité de blocage et de quantité d'informations échangées;
- une stratégie identique consiste à évaluer les K chemins simultanément (K-PAR), donc il s'agit d'un protocole à agressivité forte vers l'aval. La quantité d'informations échangées est statistiquement plus grande et par « bouffées », la latence en est d'autant réduite;
- le saut par saut (*hop by hop*) est une forme de calcul séquentiel pour un chemin dans lequel le nœud source délègue à son prochain nœud intermédiaire le soin de relayer la procédure de réservation. La connaissance globale est ainsi obtenue de proche en proche. Il s'agit d'une architecture vers l'aval analogue au routage au niveau IP, offrant un bon compromis en termes de latence et de quantité d'informations échangées;

- une inondation totale (cf. FF) est la solution la plus agressive et donnant lieu à un trafic de contrôle en bouffées. Des mécanismes d'évitement de boucles sont institués, et les nœuds intermédiaires ne retiennent que les messages donnant la meilleure qualité (on dégrossit la quantité de requêtes de la source vers la destination);
- la méthode par sondage propose toutes les longueurs d'onde disponibles et le nœud destinataire sélectionne (ou bloque) la meilleure longueur d'onde. La réservation n'est pas effectuée vers l'aval, c'est le nœud destinataire qui initie la réservation. Solution à latence en moyenne plus élevée donc mais à l'agressivité la plus faible.

Notez que selon que le chemin optique est prédéterminé par une architecture ou obtenu de proche en proche, on spécifiera que le routage est explicite (*explicit routing*) dans le premier cas, et implicite dans le second (*implicit routing*).

1.5 Conclusion

La contrainte apportée sur la couche optique de l'augmentation soutenue de la demande en trafic liée au succès d'Internet, mêlée à l'apparition potentielle de nouvelles applications exigeant des types de service divers, se traduit par le besoin de faire les choses simplement, de maintenir les coûts d'opération suffisamment faibles.

Nous avons vu tout le potentiel de la fibre optique. Ce médium offre une bande passante potentielle que nous n'utilisons pas à ce jour à pleine capacité. Mais ce potentiel doit être correctement utilisé de façon à proposer des réseaux optiques de future génération qui répondent aux critères précédemment évoqués. Ceci passe par :

- des architectures reconfigurables, comme les réseaux transparents basés sur des commutateurs sélectifs en longueur d'onde;
- mais aussi par un plan de contrôle visant à gérer les ressources du réseau de manière optimale et rapide, de par la collecte des données, l'asservissement des équipements et le calcul de route optimale etc.).

Dans le chapitre deux sont présentés les concepts propres aux réseaux optiques sans filtre. Nous les y comparons vis-à-vis des architectures reconfigurables précédemment discutées, en plus de dresser un bilan de leurs caractéristiques particulières. Nous nous concentrons ensuite au chapitre trois sur la manière dont un plan de contrôle peut gérer ces caractéristiques.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

2.1 Présentation d'un réseau optique sans filtre

2.1.1 Comparaison avec un réseau photonique actif transparent

Un réseau optique (ou photonique) à commutation active (que nous appellerons par abus réseau optique actif), consiste dans les faits en un réseau présenté dans la section 1.3.1.2 sur les réseaux transparents, reconfigurables, à base de ROADM. Dans les réseaux actifs, les circuits optiques sont commutés à l'aide de commutateurs sélectifs en longueur d'onde, où d'interconnexions optiques. Ceci peut présenter plusieurs limites, notamment en termes de :

- coût,
- consommation électrique requise pour établir et maintenir les circuits et interconnexions,
- présence de nombreux filtres en cascade qu'il faut en effet maintenir alignés pour que les signaux des canaux optiques ne soient pas trop dégradés.

La figure 2.1, tirée de Tremblay, *et al.* (2006), présente un réseau de référence allemand à sept nœuds, un de ceux qui seront utilisés dans le chapitre quatre pour valider les concepts des réseaux sans filtre présentés dans le chapitre trois.

Ce réseau possède onze liens bidirectionnels (numérotés dans les losanges), ou encore, vingt deux liens unidirectionnels. La figure 2.1 représente un résultat, pour les réseaux photoniques actifs issu du routage et de l'assignation de longueurs d'onde (*routing and wavelength assignment*, RWA) correspondant à une matrice de trafic (Betker *et al.*, 2004) totalisant 148 connections. Chaque boîte correspond de fait à la définition d'un canal optique (c'est-à-dire de sa longueur d'onde). Par exemple Bremen et Hamburg communiquent sur le lien 1 par l'intermédiaire de deux connexions reposant sur les longueurs d'onde 1 et 2. Pareil raisonnement peut être reproduit pour tout le reste du réseau.

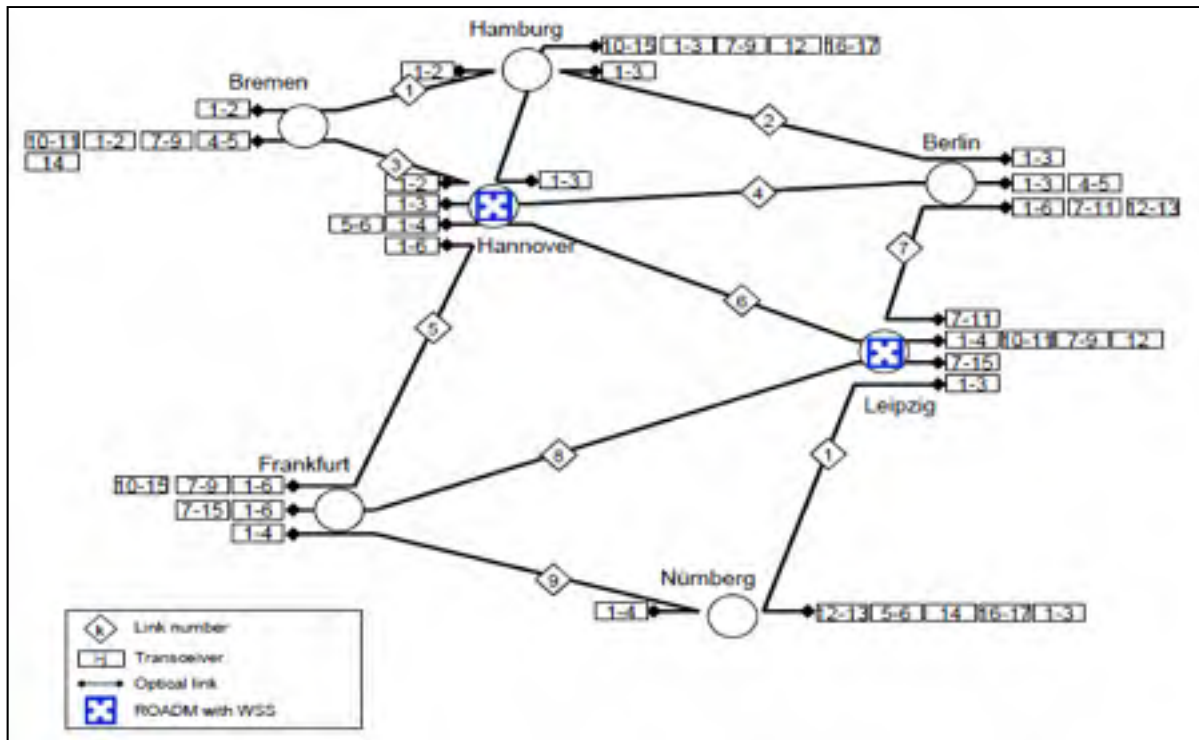


Figure 2.1 Exemple de réseau photonique actif
Tirée de Tremblay, Gagnon et Châtelain (2006, p. 19)

La figure 2.1 nous montre que ces commutateurs sont requis dans deux nœuds (Hannover et Leipzig) pour effectuer la commutation des circuits dans des réseaux optiques conventionnels. Ainsi, une transmission depuis Bremen pour Berlin va utiliser les canaux numérotés 4 et 5 et devra transiter par Hannover où ces commutateurs vont permettre d'acheminer ces canaux sur le bon port (ou interface) à destination de Berlin.

2.1.2 Présentation d'un réseau optique sans filtre

Dans le cas des réseaux optiques sans filtre, ces commutateurs actifs qui permettent le maintien des circuits sont remplacés par des coupleurs de puissance optique passifs. Le signal se propage ainsi à travers le réseau sans la moindre commutation active. Les circuits sont ainsi commutés par la manière même dont les différentes interfaces nodales sont interconnectées.

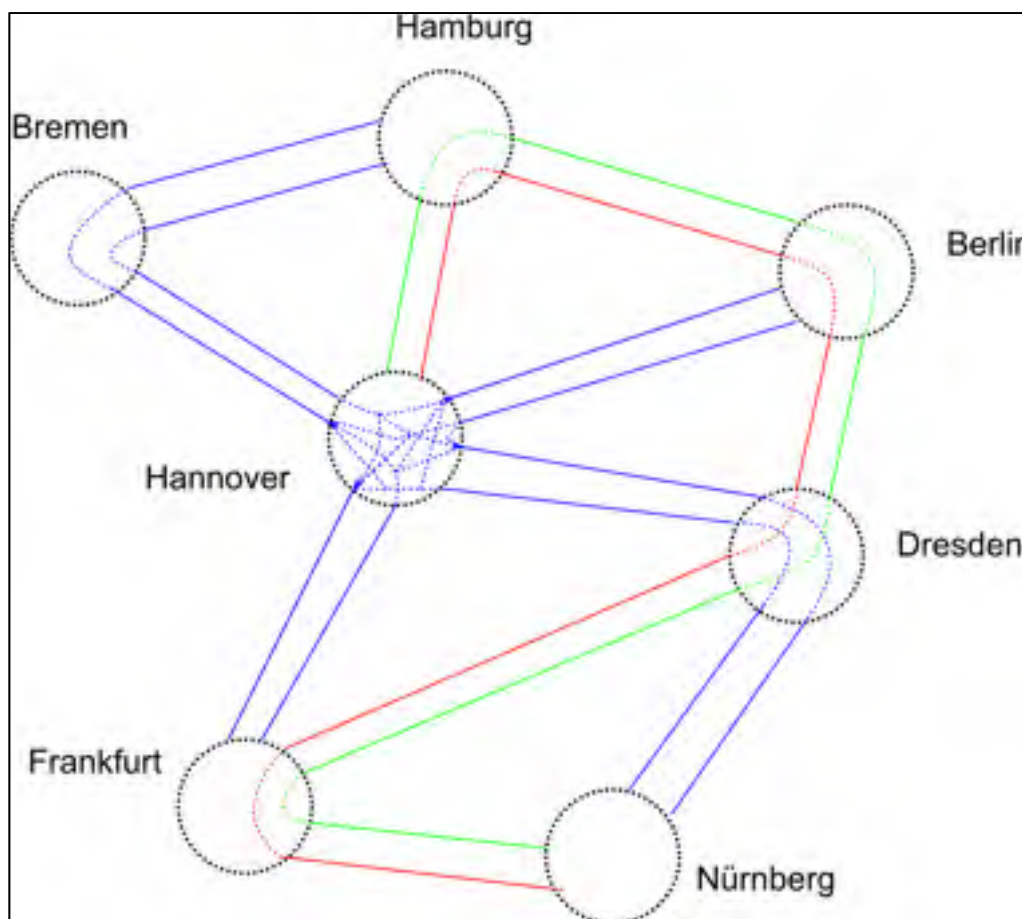


Figure 2.2 Présentation d'un réseau optique sans filtre

La figure 2.2 présente un réseau optique sans filtre couvrant le même réseau de référence. Notez que les WSS qui étaient présents à Hannover et Dresden sur la figure 2.1 ont été supprimés et remplacés par des interconnexions faites de fibre optique (liens pointillés) reliant les différents ports. Ainsi est faite la commutation passive.

L'ensemble des liens entre les nœuds et des interconnexions passives intra nodales permet de constituer un arbre passif, comme illustré en vert. Un réseau optique sans filtre est ultimement produit à partir d'un ensemble d'arbres passifs. Nous en dénombrons trois sur la figure 2.2. Notez que chaque nœud intermédiaire peut aussi accéder passivement à l'arbre qui le traverse.

De ce fait, pour permettre l'établissement des canaux entre Bremen et Berlin, on utilisera l'arbre bleu puisque celui-ci, rendu à Hannover possède un schéma d'interconnexion tel que les signaux issus de Bremen sont passivement acheminés en direction de Berlin.

La commutation est ici passive et est totalement indépendante de la longueur d'onde. Quel que soit le canal, celui sera toujours acheminé en fonction des interconnexions nodales jusqu'à la (aux) terminaison(s) de l'arbre. L'objectif du choix des arbres couvrant une topologie donnée dépend du besoin de protéger les nœuds, c'est-à-dire de permettre qu'il existe au moins deux arbres possibles pour relier deux nœuds du réseau. De ce fait, il n'est pas nécessaire qu'un arbre parcoure tous les nœuds de la topologie.

Il est important de noter que ces réseaux sont de type diffusif. En effet, en prenant une connexion issue de Hamburg sur l'arbre bleu, nous constatons qu'elle sera reçue à Bremen, mais aussi, par diffusion passive, à Hanover, puis à Berlin, Dresden, Frankfurt et Nürnberg.

Ce sont ces caractéristiques précises qui vont déterminer les stratégies de sélection de chemin et de longueur d'onde dont nous faisons l'étude à travers la suite de ce document.

2.2 Définition d'un réseau optique sans filtre

2.2.1 Présentation des concepts

2.2.1.1 Réseau de diffusion passive

Un réseau optique sans filtre, ou réseau filterless, est un réseau à commutation de longueur d'onde (WDM voire dense, DWDM) de type *broadcast and select* (Mukherjee, 2006). Dans cette configuration, le signal d'un nœud émetteur est diffusé à travers tout un réseau, l'établissement du chemin optique est achevé par la sélection à la bonne longueur d'onde du ou des nœuds destinataires.

Pour ce qui est des transmissions filaires optiques, la portée des communications est habituellement limitée par le degré de divisions, par exemple 20 km pour 32 récepteurs potentiels, ce qui contraint usuellement la définition des réseaux *broadcast and select* à des réseaux d'accès ou encore des réseaux locaux (LAN).

Les réseaux sans filtre exploitent le fait que le nombre de nœuds par arbre passif d'un réseau central n'est pas très grand (Archambault, 2008), (Enriquez, 2010). De là, il est possible d'employer des diviseurs de puissance passifs dont le degré de divisions est réduit (au plus 1x8), ce qui entraîne des pertes d'insertion optiques similaires à celles induites par des commutateurs actifs. De plus, la possibilité d'amplifier, afin de compenser les pertes induites par la division passive, offre l'avantage d'étendre considérablement la portée des transmissions, ce qui constitue l'inédit de tels réseaux.

2.2.1.2 Canal de contrôle, lasers accordables et récepteurs cohérents

Selon la nomenclature de (Mukherjee, 2006), les réseaux optiques sans filtre supportent la présence d'un canal de contrôle (OSC) et disposent de transmetteurs et récepteurs accordables (respectivement *Tunable Transceiver* (TT) et *Tunable Receiver* (TR)) pour M longueurs d'onde. Ceci permet de décliner ces réseaux selon de multiples configurations :

- on peut très bien disposer de plus de nœuds que de longueurs d'onde;
- on peut à loisir décliner autant de configurations *multicast* que souhaitées précisément parce que les récepteurs sont accordables, ceci étant rendu aisé par la structure de diffusion passive;
- des algorithmes de conception ont été mis en place (Archambault, 2008) dans le but d'optimiser la création de structures de diffusions entre les nœuds, de façon à réduire l'épuisement des ressources engendré par ce concept (i.e. *wavelength usage*).

2.2.1.3 Connexions en un saut

Les réseaux sans filtre présentent en outre la dernière propriété suivante. Ils sont censés établir des communications en un seul saut, pour des diamètres de réseau inférieurs à 1500

km, c'est-à-dire que tous les nœuds sont reliés deux à deux directement et que le signal n'a pas à être régénéré aux nœuds intermédiaires, pour une réduction de la latence et des coûts.

De la figure 2.3, nous retrouvons le concept ainsi présenté. A partir de la définition d'un arbre optique passif sans filtre, moyennant le placement judicieux des interconnexions nodales (Archambault, 2008), il nous est ainsi possible de réaliser des adjacences physiques directes entre les quatre nœuds de cet arbre. Du coup, il nous est possible de réaliser une topologie virtuelle maillée similaire à celle présente dans les réseaux à commutation active.

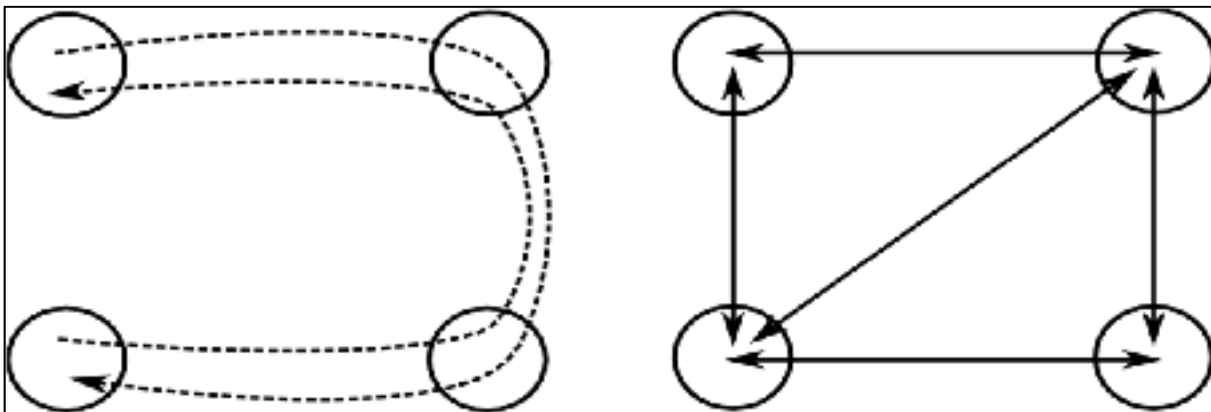


Figure 2.3 Arbre optique passif sans filtre (à gauche)
et architecture virtuelle ainsi réalisée (à droite)

De plus, cette passivité entraîne que le chemin optique d'une connexion n'emploie qu'une seule longueur d'onde entre le nœud source et le nœud destinataire. Ceci implique au niveau du choix d'une route optimisée, la contrainte dite de l'unicité de la longueur d'onde (Mukherjee, 2006).

2.2.2 Technologies habilitantes

On peut compter les principes suivants aux réseaux optiques sans filtre, reposant sur des technologies habilitantes (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006) :

- la compensation est assurée électroniquement, et non par l'usage de fibre à compensation de dispersion (DCF). Ceci marque le retour des « modems » en optique, où lors de

- l'établissement d'une connexion, émetteur et récepteur s'échangent une « carte » représentant la fonction de transfert de la fibre optique;
- le signal est modulé selon un format de modulation dit avancé (i.e. DQPSK ou QAM) où au lieu d'effectuer une modulation classique d'intensité (IM) on choisit par exemple de moduler la porteuse sur quatre phases;
 - l'émission et la réception sont accordables pour la sélection d'une longueur d'onde particulière. Ceci réduit les frais d'inventaire par le déploiement de composants génériques, tout en déplaçant l'agilité de la commutation aux extrémités des chemins optiques;
 - des diviseurs de puissance optique passifs remplacent aux nœuds intermédiaires les commutateurs optiques, d'où une réduction de la consommation en électricité qui va de pair avec une diminution des coûts;
 - ces diviseurs permettent la définition d'arbres de fibres optiques potentiellement multipoint à multipoint reliant les nœuds deux à deux directement sans la présence de la moindre commutation intermédiaire.

La figure 2.4 résume les points soulevés précédemment (Tremblay et *al.*, 2010). Dans une architecture photonique active (en a), les récepteurs sont fixes en longueur d'onde. Ils ne sont pas reconfigurables. La gestion des pertes et de la dispersion occasionnée par la fibre optique de transport est réglée par des amplificateurs exploitant éventuellement l'effet Raman et une fibre de compensation de dispersion (DCF).

La modulation est classique au sens où il s'agit d'une modulation en intensité de type « allumé-éteint » ou *On-Off Keying* (OOK). Éventuellement, des dispositifs de compensation de la dispersion et de dispersion modale de polarisation effectuent la fonction de remise en forme de façon à garantir un BER à la réception convenable.

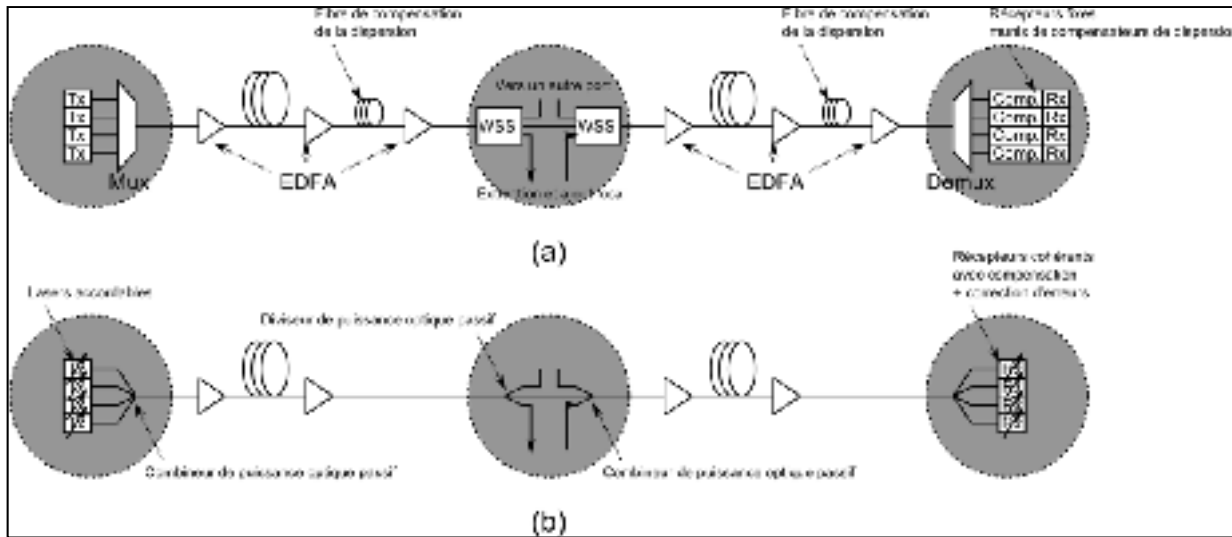


Figure 2.4 Présentation d'une ligne de transmission photonique active (a) et sans filtre (b)
Adaptée de Mantelet (2012, p. 5)

Dans le cas d'un réseau optique sans filtre en revanche (en b), les transmetteurs et récepteurs exploitent la possibilité de reconfigurer la longueur d'onde. A partir de là on peut exploiter des formats de modulation avancés, basés sur la modulation de phase, en plus de dispositifs électroniques de compensation de la dispersion (*digital signal processing*, DSP). La réception est cohérente, et la compensation de la dispersion est effectuée à la transmission (pré compensation), et/ou à la réception (post compensation).

De ce fait, il est ainsi possible de s'affranchir des fibres DCF, donc de réduire les pertes de puissance optiques d'insertion qui y sont rattachées, et en bout de compte de simplifier le nombre d'étages d'amplification par site (suppression d'amplificateurs à base de fibre optique dopée à l'erbium, EDFA). Enfin, comme nous l'avons vu, les filtres (multiplexeurs et démultiplexeurs) ainsi que les commutateurs ont été remplacés par des diviseurs et combineurs de puissance optique passifs.

2.2.3 Présentation d'une architecture nodale optique sans filtre

Dans cette section, nous effectuons la description d'une architecture nodale sans filtre et la comparons avec son équivalent actif. Nous souhaitons ainsi prouver qu'il est possible de définir une solution sans filtre à partir des composants même existant actuellement (Nortel, 2009), c'est-à-dire qu'aucun changement de paradigme n'est introduit dans la façon d'opérer ces réseaux.

La figure 2.5 présente une architecture nodale active basée sur des commutateurs actifs. Les liens entre les différents composants représentent ici des fibres optiques.

Quand le signal parvient au port d'entrée du nœud, il a parcouru une section de fibre optique d'environ 80 km et a donc accumulé sur son parcours de la dispersion et des pertes. C'est pourquoi il est amplifié une première fois par un amplificateur possédant deux étages, le premier pour compenser les pertes induites par le lien optique à proprement parler, et le second pour celles de la fibre DCF.

Le signal parvient ensuite à un diviseur de puissance optique passif symbolisé par une boîte munie d'un sigma, où il est simultanément :

- extrait localement avant de franchir un démultiplexeur sélectif en longueur d'onde, car les récepteurs sont à détection directe;
- envoyé dans le maillage au centre de la figure où les différents commutateurs WSS placés aux ports de sortie décident de bloquer ou de laisser passer certaines de ses longueurs d'onde.

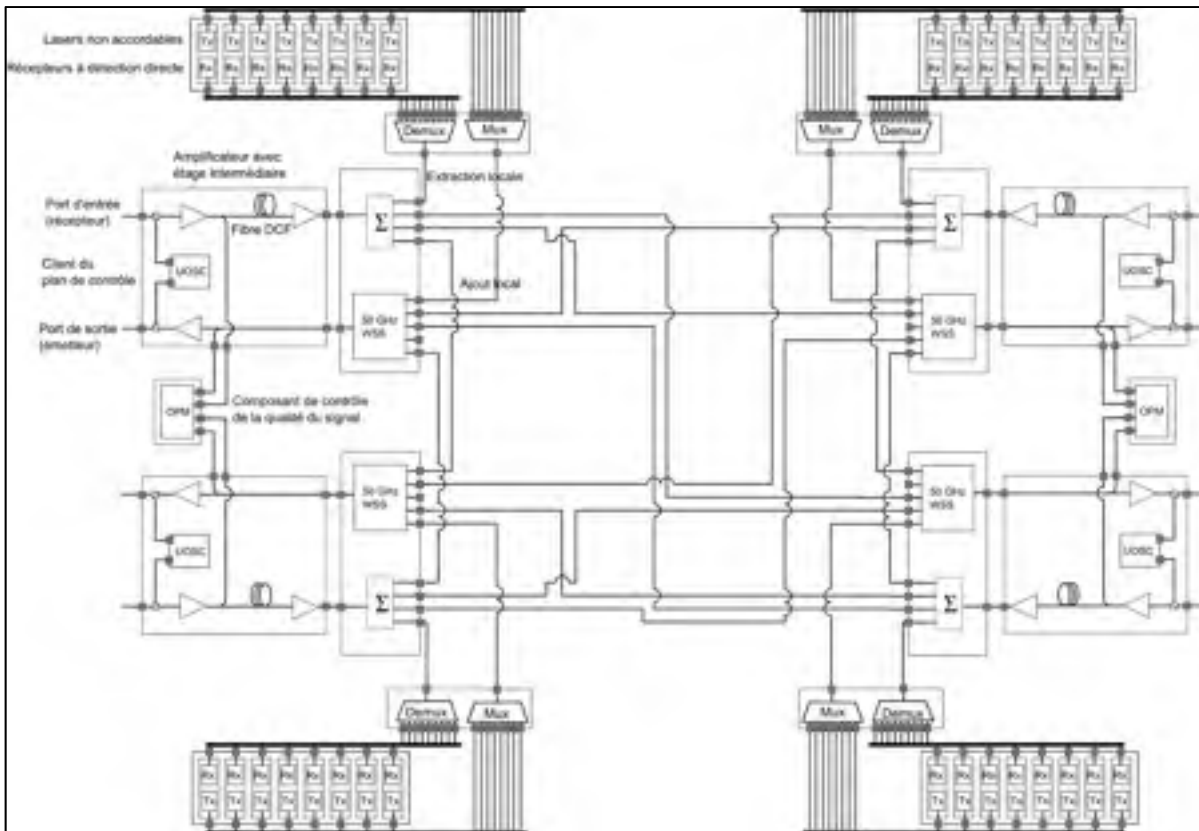


Figure 2.5 Description d'une architecture nodale photonique active

Le signal est aussi ajouté localement à l'aide du multiplexeur sélectif en longueur d'onde avant de parvenir au commutateur situé sur le port de sortie. Ce commutateur est précisément capable de contrôler les longueurs d'onde qui passent à travers et de s'assurer qu'il n'y aura pas de collision de longueur d'onde sur le port de sortie.

Enfin, l'on note la présence d'un client du plan de contrôle possédant un seul port (UOSC), ainsi qu'un composant permettant de contrôler la qualité du signal (OPM).

Par contraste, la figure 2.6 présente l'équivalent sans filtre pour laquelle tous les filtres et commutateurs actifs ont été remplacés par des diviseurs et des combineurs de puissance optique passifs. On remarque les différences fondamentales suivantes :

- les amplificateurs ne possèdent pas d'étage intermédiaires à partir du moment où des dispositifs de compensation de la dispersion électriques sont déployés, la fibre DCF

- devient ainsi obsolète et il n'est donc plus nécessaire de compenser les pertes d'insertion qui y étaient rattachées;
- dans le même ordre d'idée, les récepteurs sélectifs en longueur d'onde permettent de remplacer les multiplexeurs et démultiplexeurs précédents par des composants totalement passifs et non sélectifs en longueur d'onde;
 - le composant du plan de contrôle présent dans chaque nœud, aussi appelé client, doit ici être légèrement modifié afin de permettre d'implémenter des fonctionnalités décrites dans le chapitre trois. Il possède ici deux ports (*Filterless Dual Optical Supervisory Channel, FDOSC*).

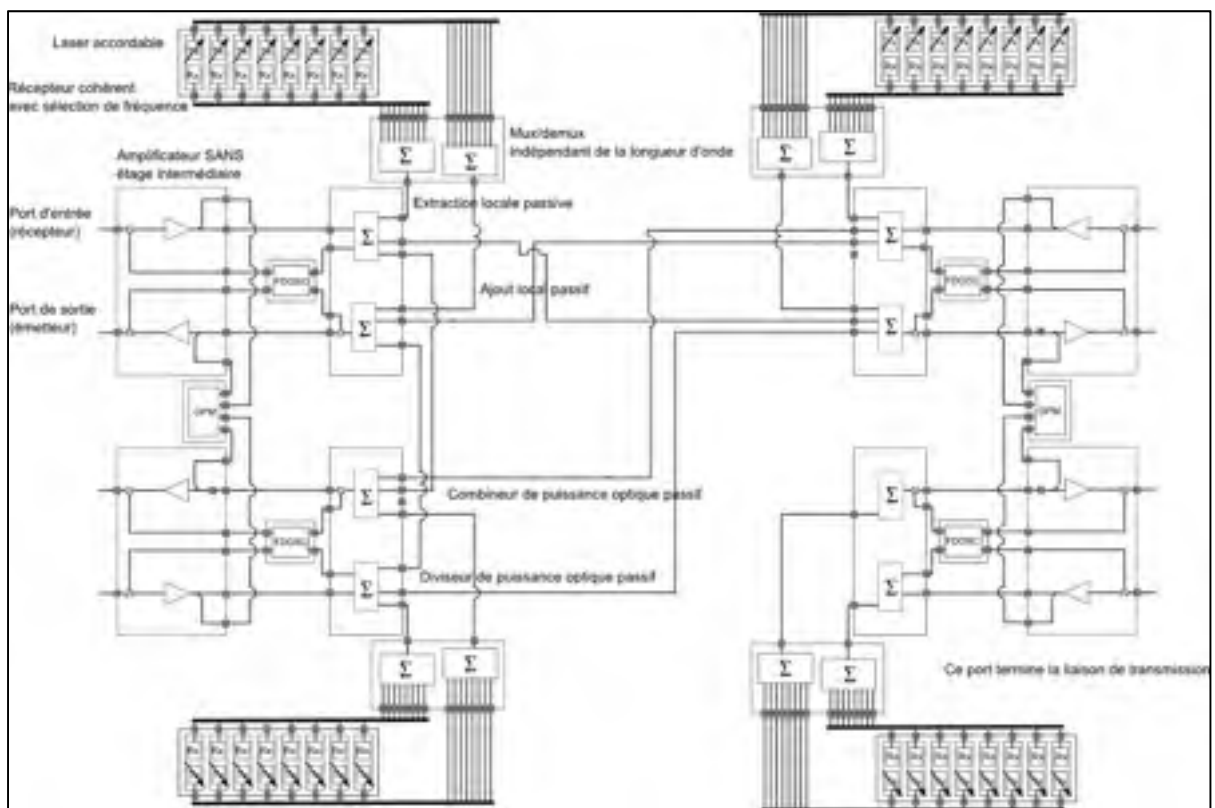


Figure 2.6 Description d'un nœud optique sans filtre

Dans l'exemple de la figure 2.6, le maillage diffère par rapport à celui d'un nœud photonique actif. En effet, à partir du moment où les commutateurs actifs ont été supprimés, la commutation est effectuée passivement par ces interconnexions situées au centre de la figure.

Ceci permet de constater la différence dans l'aspect du risque de collision de longueur d'onde. Aux nœuds actifs dont les commutateurs, moyennant un plan de contrôle efficace, sont en mesure d'empêcher dynamiquement les collisions, on doit opposer l'évitement passif de ces collisions aux ports de sortie. En effet, les diviseurs et combineurs de puissance optique passifs étant dans l'incapacité d'arrêter les signaux, aucun mécanisme n'est disponible pour empêcher les collisions susceptibles de survenir. Il faut donc en transposer au plan de contrôle leur prévision afin qu'il les calcule et les évite.

Quoiqu'il en soit, aucun changement de paradigme n'est requis puisqu'à partir de composants déjà existants (Nortel, 2009), nous sommes en mesure de recréer des architectures optiques sans filtre similaires aux architectures à commutation active.

2.3 Étapes de conception d'un réseau sans filtre

Cette section a pour but de récapituler les travaux antérieurs sur lequel se fonde la présente thèse. Archambault (2008) y présente les outils de conception des réseaux optiques sans filtre. Il s'agit ici de l'entrée de l'étude, c'est-à-dire que la validation des critères présentés dans le chapitre trois se base sur les solutions issues de ces travaux. Puis, Enriquez (2010) étend le concept aux réseaux de plus large envergure. Il s'agit d'un exemple limite démontrant certaines recommandations ultérieures à fournir. Enfin, Savoie (2010) définit un prototype de validation directement intégré dans la validation du chapitre quatre.

Ces différents travaux constituent une séquence, présentée ici, dans le but de produire des topologies optiques sans filtre valides, telles que celle présentée à la figure 2.2. Il est ainsi nécessaire dans un premier temps de trouver les configurations possibles qui permettent de maximiser les performances (protection, latence, utilisation des ressources optimales etc.) du réseau, et ainsi de définir le placement des arbres.

A partir des paramètres d'entrée (topologie du réseau, matrice de trafic) et des contraintes (capacité totale offerte, portée physique maximale du système, prévention des boucles laser et dégradation excessive du signal), on dispose des trois outils suivants :

- un outil de placement des fibres optiques, basé sur un algorithme génétique dont le but est de maximiser une fonction objective basée essentiellement sur le ratio de protection (c'est-à-dire le nombre de nœuds qui peuvent être joints par au moins deux arbres depuis un nœud source quelconque);
- un outil de routage et d'affectation de longueurs d'onde, basé sur un algorithme de recherche taboue;
- un algorithme de validation physique aide à évaluer l'accumulation des distorsions physiques le long des arbres optiques ainsi offerts en solution par les deux précédents outils;
- les solutions offertes par les trois derniers outils permettent d'évaluer le nombre d'arbres passifs, le nombre total de diviseurs passifs de puissance optique, le nombre de longueur d'onde utilisées, la qualité du signal à la réception.

2.3.1 Routage

D'abord, un algorithme de placement des connections à l'intérieur des nœuds permet de relier passivement plusieurs ports d'entrée avec les ports. Chacune de ces configurations internes accouche au final d'une construction d'arbre spécifique. Dès lors, le nombre de possibilités croît avec le nombre de nœuds et de liens, et demande l'usage d'algorithmes puissants, comme les algorithmes génétiques (Archambault, 2008).

La figure 2.7 nous montre ainsi deux possibilités de créer des interconnexions dans un nœud possédant quatre interfaces. Un même nœud présentant quatre ports est présenté à gauche et à droite. Les flèches figurent ainsi les liens unidirectionnels entre les nœuds, constitués de fibre optique. Les ports sont interconnectés par de la fibre optique, comme dans la figure 2.2.

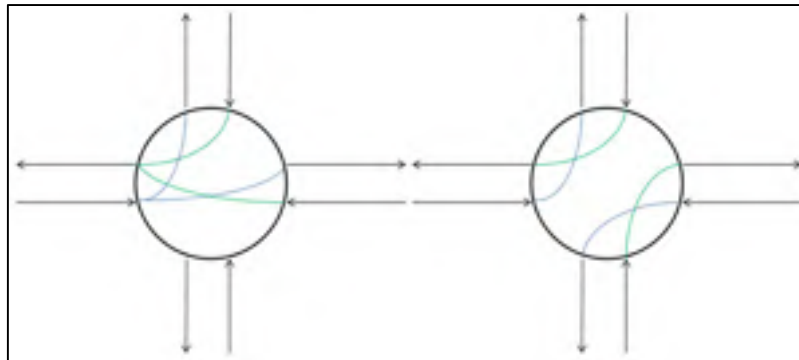


Figure 2.7 Deux configurations nodales possibles

Nous remarquons qu'une multitude de configurations existent selon la façon d'interconnecter les ports entre eux. Le nombre total d'interconnexions dans un réseau est donné par l'équation (2.1) :

$$I = \prod_{i=0}^{I-1} 4^{\frac{d_i(d_i-1)}{2}} \quad (2.1)$$

L'équation (2.1), est un produit sur tous les nœuds du réseau du nombre d'interconnexions possibles de chacun d'entre eux, selon une suite que l'on retrouve dans Weisstein (2003, p. 531). On utilise le chiffre quatre pour représenter les quatre possibilités dont sont connectés les ports bidirectionnel deux à deux dans un nœud (connecté bi-directionnellement, non connecté, connecté uni-directionnellement), de façon à inclure la possibilité d'obtenir des arbres symétriques ou asymétriques tel que décrit dans Enriquez (2010).

Le tableau 2.1 illustre le nombre de topologies sans filtre qu'il est possible d'obtenir pour trois réseaux obtenus de Betker et *al.* (2004) et Ali (2005) et le temps de calcul qu'il serait nécessaire à un algorithme de type *brute force* pour toutes les dénombrer s'il lui faut 10 ns par interconnexion.

Tableau 2.1 Dénombrement des topologies sans filtre possibles

| Réseau | Nombre de possibilités | Temps de calcul équivalent |
|----------|------------------------|----------------------------|
| 7 nœuds | $1.8.10^{16}$ | 5.7 ans |
| 10 nœuds | $4.7.10^{21}$ | $1.5.10^6$ ans |
| 17 nœuds | $1.36.10^{39}$ | $4.3.10^{23}$ ans |

L'interconnexion passive des ports d'entrée et de sortie de chaque nœud permet de construire de proche en proche un ensemble d'arbres passifs. La figure 2.8, tout comme la figure 2.2, en présente un résultat (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006), (Archambault, 2008). Les dix-sept nœuds sont reliés entre eux via quatre arbres optiques sans filtre figurés chacun par une couleur différente. Pour ce faire, l'emploi d'un algorithme génétique permet de générer en plusieurs itérations des propositions de topologie, et la sélection est effectuée par la maximisation du ratio de protection des nœuds.

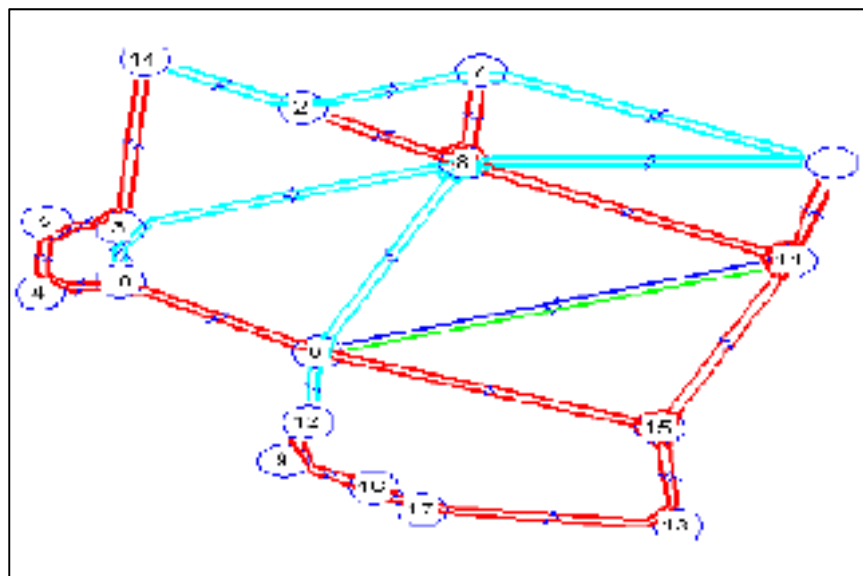


Figure 2.8: Une solution topologique constituée d'arbres sans filtre,
Tirée de Tremblay et *al.* (2010, acétate 5)

A l'intérieur du nœud, les interconnexions effectuent le lien entre les interfaces de façon à ce que deux liens de la même couleur appartiennent au même arbre. On constate ainsi que le

nœud 14 est relié au nœud 3 par le truchement de deux arbres : l'arbre rouge directement, mais aussi l'arbre cyan, en passant par les nœuds 2, puis 7, 1 et 8.

Dans le cas où le réseau est plus grand que la limite de portée du système de transmission, comme dans le cas du réseau américain (de type WAN), on peut utiliser un algorithme de morcellement en « îlots » ou sous régions de taille plus accessibles de façon à pouvoir faire fonctionner l'algorithme de création d'arbres (Enriquez, 2010). Il s'agit de placer des nœuds régénérateurs qui vont filtrer certaines connexions de façon à séparer les régions. Un concept repris dans les réseaux semi-sans filaire.

La figure 2.9 présente trois nœuds régénérateurs permettant de scinder un réseau en trois îlots (respectivement brun, vert et rouge). Une transmission issue par exemple du nœud A du réseau brun pour le nœud B du réseau rouge devra ainsi être régénérée deux fois (amplifiée, remis en forme, et resynchronisé) par ces nœuds.

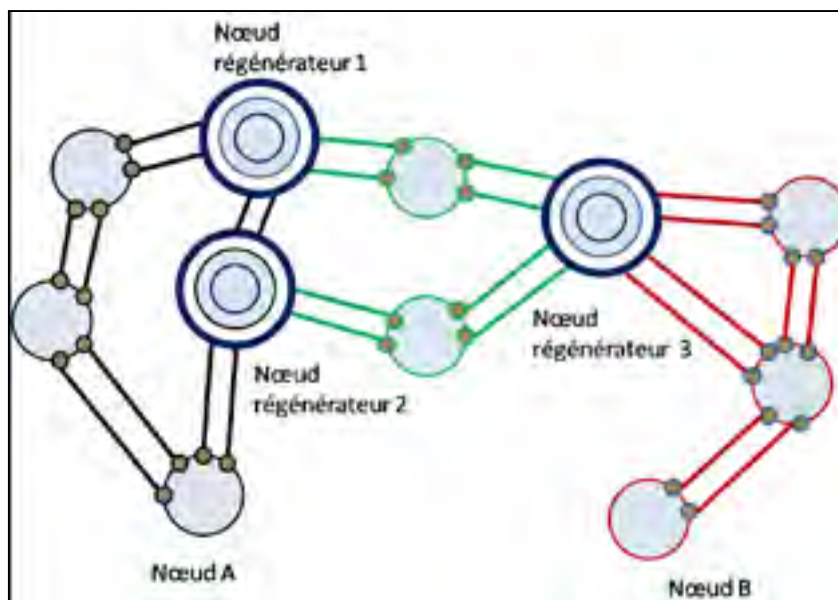


Figure 2.9 Trois îlots séparés par des nœuds régénérateurs,
Tirée de Enriquez (2010, p. 26)

2.3.2 Assignment de longueurs d'onde

En second lieu, un algorithme de recherche taboue effectue l'assignation optimisée des longueurs d'onde à partir de la matrice de trafic et sur la topologie précédemment obtenue. Il s'agit d'un algorithme optimisé statique (cf. chapitre quatre) démarré d'une connaissance totale des connexions à établir. Ce placement tient compte des connexions à construire simultanément, l'enchaînement séquentiel des connexions sur un réseau opérant est une affaire de plan de contrôle.

La figure 2.11 présente sur un réseau allemand à sept nœuds une telle solution (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006). Cette solution permet la définition de deux arbres passifs en rouge et en pointillé bleu. Les distances physiques entre les nœuds figurent sur les liens. Le résultat de l'assignation des longueurs d'onde est donné par les chiffres dans les boîtes.



Figure 2.10: Assignment des longueurs d'onde sur une topologie envisagée
Tirée de Tremblay, Gagnon et Châtelain (2006, p. 24)

Il s'agit de la contrepartie sans filtre de la figure 2.1. La demande de trafic est exactement la même entre les deux solutions. Nous avons vu que les transmissions de Bremen à Berlin occupaient deux longueurs d'onde (numérotées 4 et 5) et étaient commutées à Hannover. Dans le cas de cette solution optique sans filtre, on remarque que Berlin n'est en aval de Bremen que par l'intermédiaire de l'arbre bleu. C'est donc à travers Hamburg que vont transiter ces données. Les longueurs d'onde choisies ici sont les 30 et 31.

Nous rappelons que les longueurs d'onde 32 et 33 de Brême destinées à Hamburg se propagent tout de même jusqu'à Berlin, puis Leipzig, Frankfurt, Hannover, avant de revenir une dernière fois à Hamburg. Pour éviter la moindre collision de longueur d'onde entre ces transmissions et celles issues de ces nœuds, prenez note que ces longueurs d'onde ne peuvent être réassignées. Il s'ensuit que dans cet exemple, nous nécessitons 75 longueurs d'onde, contre 17 pour la figure 2.1. Il est important de trouver des mécanismes pour réduire cet usage important, comme nous le verrons dans le reste de cette thèse.

2.3.3 Présentation des réseaux optiques semi sans filtre

Il est possible de manière facultative de placer des bloqueurs de longueur d'onde dans une topologie optique sans filtre en supplément de façon à réduire le nombre de longueurs d'onde utilisées par la solution pour accommoder une matrice de trafic donnée, mais aussi à permettre la réutilisation de longueurs d'onde dans des endroits stratégiques du réseau (Archambault 2009).

Dans ce cas particulier, un tel réseau est appelé réseau semi sans filtre précisément parce que quelques filtres sont insérées dans la topologie en vue d'optimiser son rendement (Chen et al., 2011). L'idée consiste à insérer des filtres sélectifs en longueur d'onde passifs, comme par exemple les fibres à base de réseaux de Bragg (*fiber Bragg grating*, FBG).

Les étapes de création d'un réseau semi sans filtre dès lors incluent une phase supplémentaire après les phases de placement des interconnexions et de routage précédemment étudiées. En

premier lieu le placement stratégique des filtres à certains nœuds est effectué selon un algorithme heuristique dont le but est de minimiser le nombre de longueurs d'onde utilisées. Puis la phase d'assignation des longueurs d'onde est ensuite exécutée.

La figure 2.11 présente les différences topologiques entre un réseau optique sans filtre (a) et semi sans filtre (b), pour l'établissement de quatre chemins optiques symbolisés par LP (*lightpath*) et le numéro correspondant, et dépendamment de la façon dont les interconnexions sont effectuées. Par exemple, le nœud 2 présente deux tels diviseurs et combineurs passifs de façon à ce que les connexions 1, 2, 3 et 4 nécessitent trois longueurs d'onde selon le graphe de conflit correspondant.

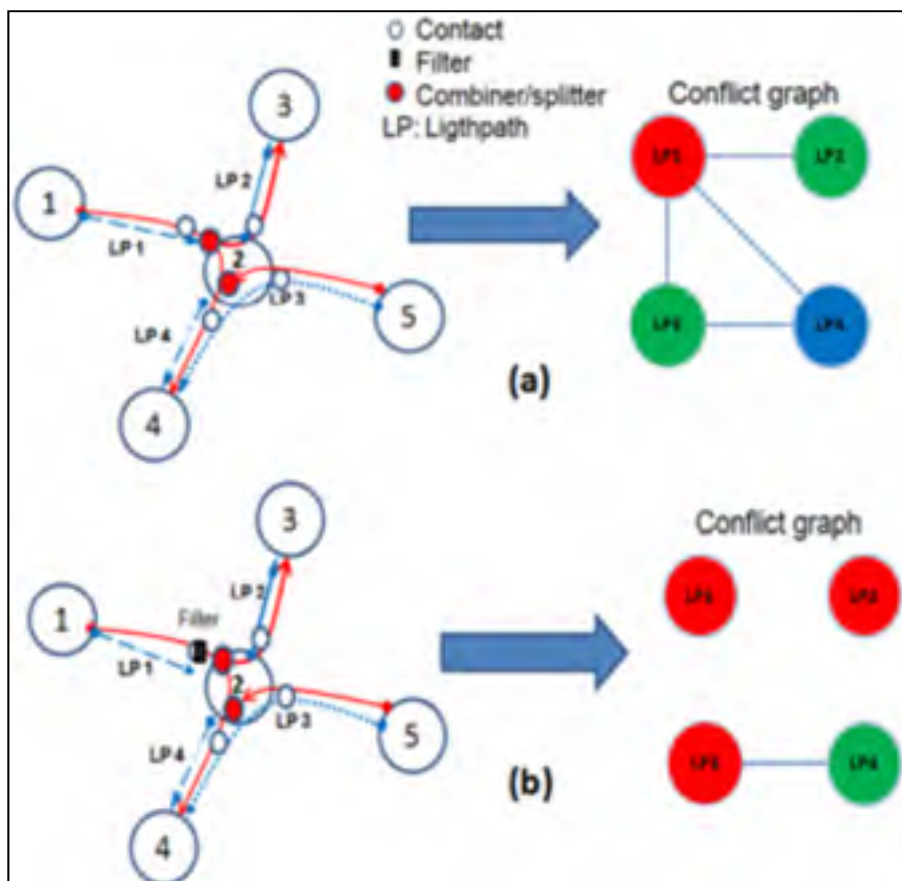


Figure 2.11 Différence entre un réseau optique sans filtre (a) et semi sans filtre (b), Tirée de Khanmohamadi et *al.* (2011)

En revanche, l'insertion d'un filtre (carré noir en (b)) permet d'empêcher que la connexion 1 ne se propage au-delà et n'entraîne de collision avec les connexions 2 et 3. En vertu de quoi seules deux longueurs d'onde sont requises, ce qui constitue un cas de figure où le nombre de longueurs d'ondes utilisées est réduit. Le placement stratégique des filtres est pressenti pour diminuer le nombre de longueurs d'ondes utilisées, comme vu dans la section précédente, et ramener ce nombre proche de celui d'une solution optique à commutation active.

Les travaux portant sur les réseaux semi sans filtre sont actuellement menés à l'Institut Royal de Technologie KTH de Stockholm, en Suède, et dépassent le cadre de la présente thèse qui se borne à l'étude des réseaux optiques sans filtre strictement. Notez que ces réseaux peuvent permettre de réduire passivement certains des effets et contraintes décrits ci-après.

2.3.4 Validation physique

Plusieurs phénomènes liés à la fibre optique entraînent des distorsions susceptibles de limiter la portée des transmissions et doivent être quantifiés dans un plan de contrôle de façon à éviter de vouloir établir des chemins optiques entraînant des taux d'erreurs au-delà de la valeur requise.

Un crible est nécessaire pour valider les topologies obtenues, c'est-à-dire de s'assurer que les transmissions auront un minimum d'erreurs. La portée étant un facteur limitant, dû à l'accumulation progressive du bruit des amplificateurs, les réseaux optiques sans filtre présentent aussi la possibilité de combiner des branches, donc de sommer les bruits issus des branches accolées.

Une méthode de validation a donc été proposée pour étudier les arbres constitués par les algorithmes de création d'îlots et de placement des interconnexions passives (Savoie, 2010). L'algorithme proposé par Savoie (2010) à partir de la méthode proposée peut être facilement

introduit dans un plan de contrôle performant de validation physique de connexion, ou supportant une stratégie de recherche du chemin physique ayant la meilleure qualité possible.

La figure 2.12 présente l'estimation de l'accumulation du bruit sur une ligne de transmission optique passive. Le bruit augmente progressivement à mesure que des amplificateurs optiques sont traversés. Le brusque saut correspond au fait que deux branches sont combinées et donc que leurs bruits respectifs sont ajoutés.

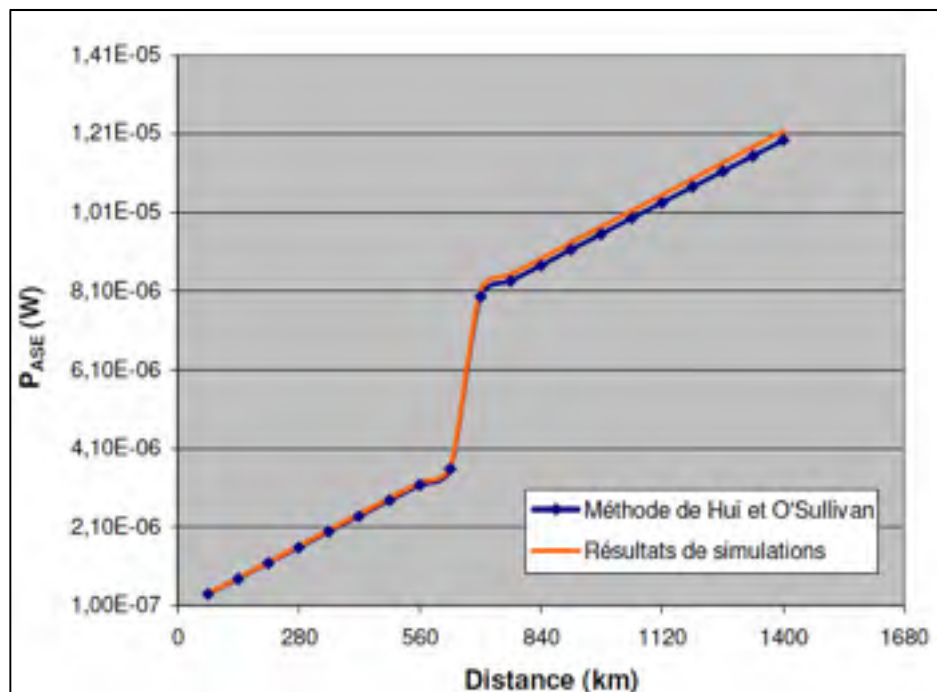


Figure 2.12: Accumulation du bruit dans une combinaison passive,
Tirée de Savoie (2010, p. 68)

2.4 Problématique associée aux réseaux optiques sans filtre

Dans cette section, nous présentons les concepts propres aux réseaux optiques sans filtre, ce qui entraîne leur divergence vis-à-vis des réseaux photoniques actifs; autant de points importants pour un plan de contrôle dédié à ces solutions, et qui sont couverts dans un article (Mantelet, 2012) soumis à la revue au journal IEEE Communications Magazine.

2.4.1 Notion de canal non filtré

Dans le cas d'un réseau optique actif, le nœud destinataire est en mesure d'extraire et de bloquer le signal qui lui est destiné. De fait, cette longueur d'onde peut être réutilisée en aval pour établir une nouvelle connexion.

Dans le cas d'un réseau optique sans filtre en revanche, ce blocage ne peut pas être effectué par les nœuds destinataires. Ce signal qui ne sera reçu par aucun autre nœud continue pourtant de se propager en aval. Comme la longueur d'onde n'est pas rendue disponible, on ne peut l'utiliser pour établir d'autres connexions en aval sans risquer d'entraîner une collision de longueur d'onde.

La figure 2.13 présente une connexion entre les nœuds 1 et 5. Cette connexion exploite la longueur d'onde λ_1 . La présence d'un diviseur de puissance optique passif au nœud 2 entraîne que ce canal se propage aussi vers les nœuds 3, 4 et 6 même s'il ne convoie aucun signal utile pour ces trois nœuds.

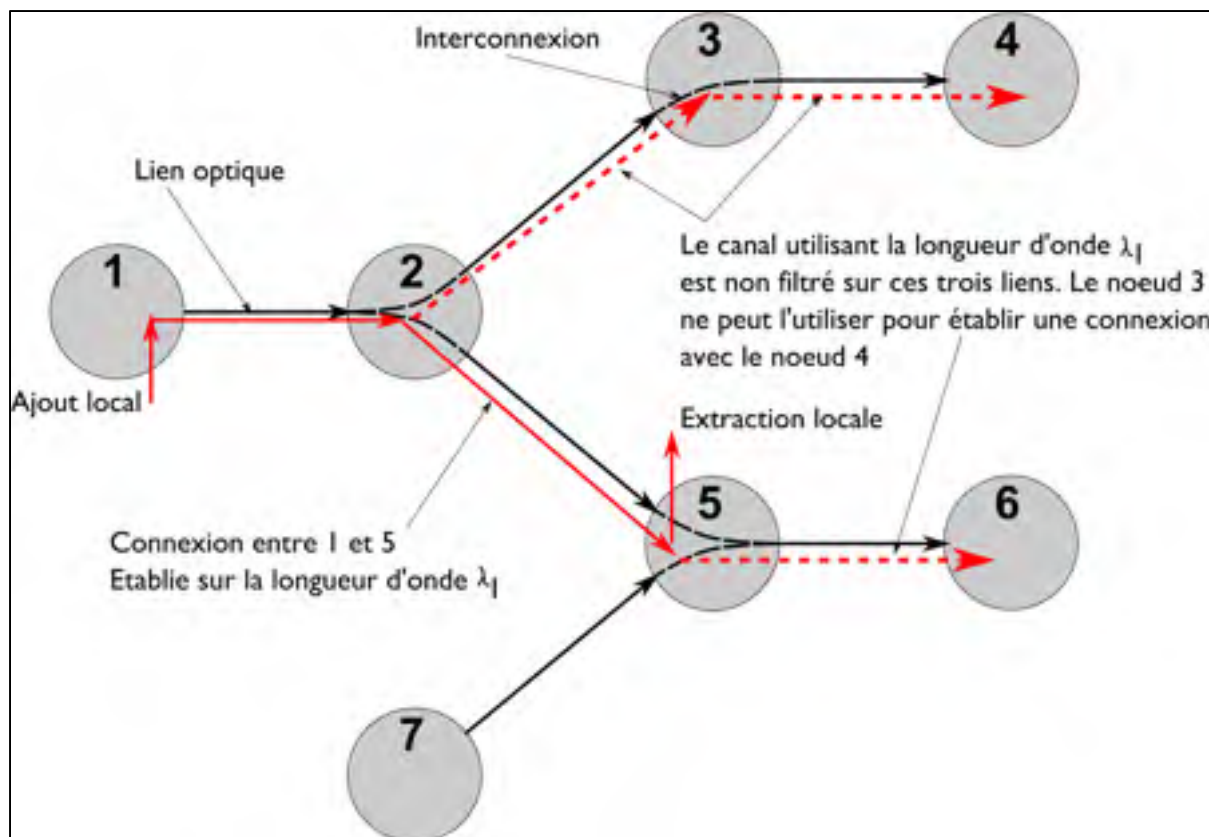


Figure 2.13 Présentation du concept de canal non filtré
Tirée de Mantelet (2012)

En ces deux endroits précis du réseau, ce canal est déclaré canal non filtré, car il serait normalement bloqué dans le cas d'un réseau actif. Si le nœud 3 veut établir une connexion vers le nœud 4, il ne peut pas utiliser λ_1 sans entraîner de collision de longueur d'onde. Dans le cas d'un réseau actif toutefois, il aurait pu puisque les deux connexions 1 vers 5 et 3 vers 4 sont disjointes.

Cette configuration se traduit ici par une hausse de l'utilisation des longueurs d'onde pour les réseaux optiques sans filtre. Le but du design ou du plan de contrôle est d'en diminuer le nombre car ces canaux participent au risque de blocage.

2.4.2 Gestion des collisions de longueur d'onde

Comme le nœud sans filtre ne peut être en mesure de bloquer lui-même les connexions qui transitent en son sein par quelque moyen que ce soit, il lui faut trouver un moyen de prévenir tout risque de collision entre les signaux.

Dans le cas de réseaux optiques actifs, l'établissement d'une connexion peut s'effectuer le long du futur chemin emprunté par la connexion. Les nœuds intermédiaires peuvent pour cela inclure les longueurs d'onde utilisées à partir de leur base de données, et donc par concaténation, il est possible de déduire la plage de longueurs d'onde inappropriées pour l'établissement d'une nouvelle connexion (Mukherjee, 2006).

En revanche, dans le cas des réseaux optiques sans filtre, il faut aussi prendre en compte les canaux non filtrés qui ne convoient aucun signal utile mais qui peuvent toutefois entraîner des collisions de longueur d'onde. Il est du coup important de considérer aussi les transmissions en dehors du chemin occupé par la connexion. Par exemple dans la figure 2.12, si le nœud 5 souhaite établir une connexion avec le nœud 6, il est impératif de déterminer aussi toutes les connexions entre le nœud 1 et le nœud 2 pour éviter des collisions en aval.

2.4.3 Formation de boucles lasers

Si par mégarde il advient une erreur de configuration dans le placement des coupleurs de puissance optique passifs, on peut se retrouver dans une situation particulièrement handicapante pour les signaux, s'il s'agit d'une boucle laser.

Dans une boucle laser, le signal ajouté par un port de sortie se retrouve à repasser par ce même port une fois s'être propagé sur un arbre. Étant donné qu'aucun système de blocage n'est présent pour arrêter le signal, celui devient, après un tour, une source de bruit amplifiée par la boucle ainsi créée. Il s'ensuit une dégradation fatale pour l'intégralité des transmissions opérées sur cet arbre passif.

Une très légère erreur d'interconnexion dans la figure 2.14 au niveau du nœud 3 provoque l'apparition d'une boucle laser (en gris en b) sur l'arbre noir, alors que le réseau est normalement fonctionnel (en a). On remarque en effet qu'en b, une interconnexion erronée a été placée de façon qu'une boucle est créée. Toute connexion qui y pénètre s'y propage indéfiniment.

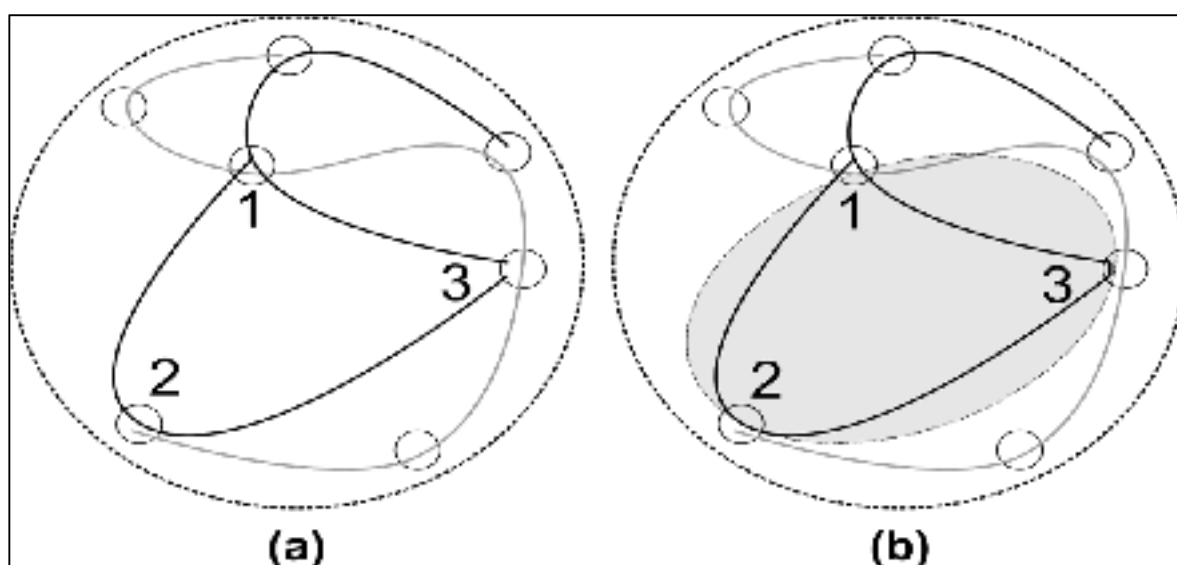


Figure 2.14 Réseau fonctionnel (a), et erreur de manipulation au nœud milieu de droite force l'apparition d'une boucle fermée (b)

Une boucle peut créer aussi une situation où plusieurs coupleurs forcent la duplication passive du signal sur deux chemins différents (dits interférentiels) avant leur recombinaison (cf. figure 2.15). La différence de longueur entre les deux chemins peut provoquer, à la recombinaison, des interférences optiques destructives nuisibles à la qualité du signal.

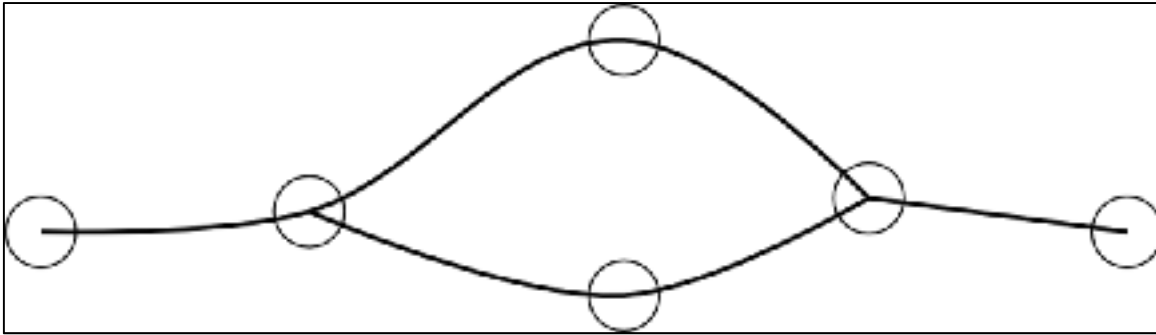


Figure 2.15 Situation d'interférence issue de plusieurs chemins recombinaison
Tirée de Tremblay, Gagnon et Châtelain (2006, p.12)

Il est donc nécessaire de prévoir ces deux phénomènes. Car leur apparition provoque l'arrêt des transmissions. Il est possible d'intervenir à deux niveaux :

- d'une part lors de la définition des solutions sans filtre par les outils de design développés par Archambault (2009), il est possible de faire une détection de boucle par un algorithme approprié. En cas de détection de boucle, la topologie est simplement rejetée (Enriquez, 2010);
- d'autre part, il faut mettre en place un système de détection par le plan de contrôle, en plus des mesures prises lors du design, de façon à s'assurer qu'aucune erreur humaine dans le placement des coupleurs n'entraîne la formation de ces boucles ou de ces chemins (cf. chapitre trois).

2.4.4 Insertion d'un nœud dans une topologie existante

Si un nœud mal configuré est ajouté à une topologie en fonctionnement, il est possible que l'on introduise une boucle laser ou des chemins interférentiels. Dès sa mise en place, il détruit alors toutes les communications existantes sur l'arbre passif, un procédé très violent qui provoque des pertes de signal et qui est donc à proscrire.

Les erreurs de configuration des nœuds découlent d'erreurs humaines. De fait, elles sont susceptibles de survenir dans les réseaux optiques actifs. Dans les pratiques de l'industrie (Archambault, 2011), on provoque un approvisionnement manuel du nœud lorsqu'on le

configure. Ensuite, le plan de contrôle, grâce à un système de surveillance de la qualité du signal intégré dans chaque nœud, est à même de déterminer si les signaux sont sains et se rendent à la bonne destination. Une erreur de configuration peut être retracée si le signal ne se rend pas au bon endroit.

Dans le cas précis des réseaux optiques actifs, notamment ceux basés sur des WSS, l'insertion d'un nœud n'entraîne pas de crash immédiat du réseau, mais seulement lorsque le plan de contrôle tente de configurer le commutateur lors de l'établissement d'un nouveau canal si celle-ci a mal été connectée. Et dans ce cas précis, l'erreur ne va porter que sur un seul canal. Au contraire, dans le cas d'un réseau sans filtre, les signaux se propagent passivement. L'erreur de la section fautive du réseau a donc un impact sur tous les canaux.

Il devient crucial de gérer à priori le risque d'une erreur de configuration lorsqu'un nœud est inséré dans une topologie car, dans le cas des réseaux optiques sans filtre toute erreur se traduit par son immédiateté et son ampleur. Un problème sérieux à considérer.

Dans la figure 2.16, l'insertion d'un nœud A au milieu du réseau a mal été effectuée (b). En effet une interconnexion passive relie ses trois ports alors qu'elle ne devrait pas relier le port en haut à droite. Résultat, une boucle a été créée. Les transmissions entre les nœuds 1, 2 et 3 sur l'arbre passif noir, pourtant initialement valide (en a à gauche), se trouvent dès lors fortement compromises.

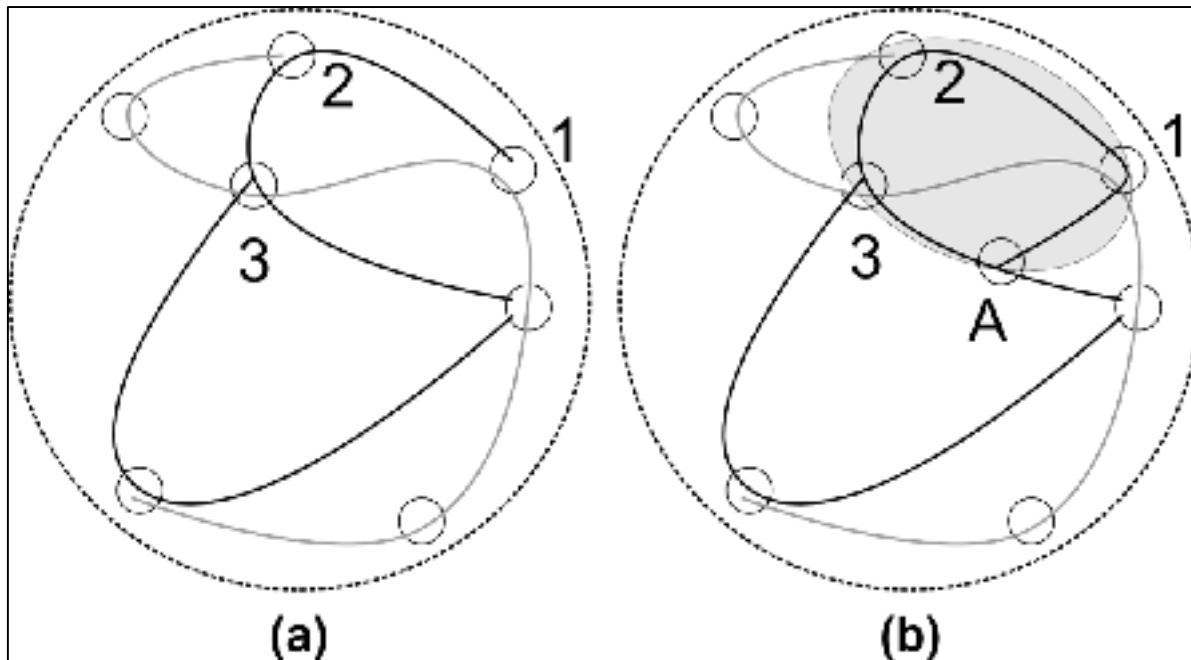


Figure 2.16 : Réseau fonctionnel (a), l'insertion d'un nœud mal configuré au centre a fait apparaître une boucle fermée (b)

Nous nous attendons que ce genre d'erreur soit rare. Toutefois, ses conséquences invalident entièrement toute la région de l'arbre passif noir entre les nœuds 1, 2, 3 et A. Il s'agit d'une erreur critique à détecter dans le plan de contrôle et à intégrer par un mécanisme adéquat dans le plan de contrôle.

2.4.5 Insertion de contenu local

La gestion de la collision, dans le cas des réseaux optiques sans filtre, entraîne l'usage d'un plus grand nombre de longueurs d'onde pour le même nombre de connexions à établir. Un bon design est en mesure de juguler cette consommation par la réduction du nombre des canaux non filtrés dans une topologie donnée.

Nous avons aussi vu que les *light-trails* permettaient d'effectuer du *traffic grooming* (Gumaste *et al.*, 2008), c'est-à-dire de grouper des signaux tributaires différents de nœuds géographiquement éloignés dans une même longueur d'onde sans entraîner de collision.

Les réseaux optiques sans filtre offrent nativement les fonctionnalités de *drop and continue* et de *passively add* (le signal est extrait et ajouté localement de manière passive), qui sont des précurseurs au déploiement des *light-trails*. Naturellement, il s'agit de réseaux capables de faire du multicast, et dans ce cas, la ressource est partagée entre plusieurs émetteurs et plusieurs destinataires.

La figure 2.17 présente une solution pour des opérateurs dont le profil est celui de diffuseurs de télévision. Une tête primaire (nœud 1) diffuse du signal sur une longueur d'onde représentée par les flèches en rouge. Ce signal possède du contenu global (figuré par une tranche canal occupée symbolisée par la lettre G), par exemple des chaînes et des émissions populaires. Les nœuds traversés, par exemple 3 et 5 peuvent insérer du contenu plus spécifique (symbolisé respectivement par le bleu et le vert et les lettres Ra et Rb) sur cette même longueur d'onde.

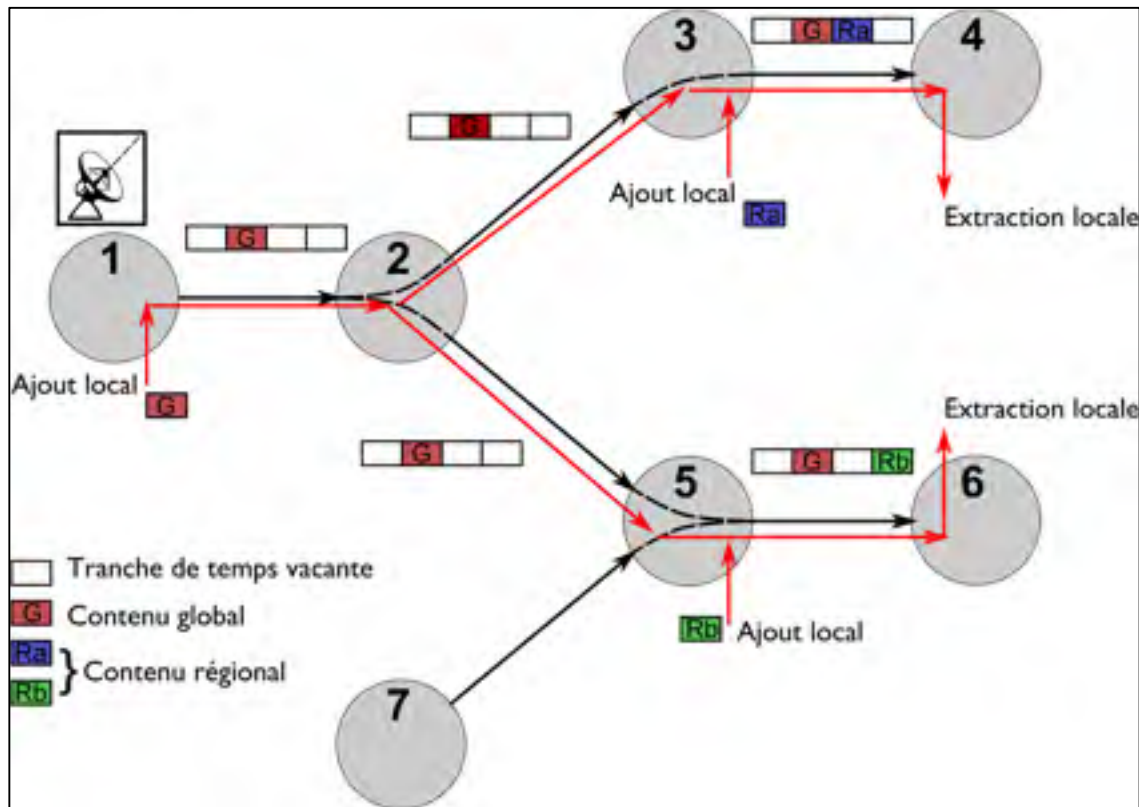


Figure 2.17 Insertion de contenu local passivement dans un *trailed light-tree*

La solution exploite les avantages suivants :

- la duplication du contenu en diffusion est effectuée passivement, elle ne requiert aucun équipement électronique et ne consomme (ni ne coûte) rien;
- le système est reconfigurable, en gardant la même topologie, le fournisseur peut réassigner ses transpondeurs à d'autres longueurs d'onde, d'autres slots temporels, à l'aide d'un plan de contrôle adapté;
- on exploite une technique de *traffic grooming* (Ye, Woesner et Chlamtac, 2006), qui peut potentiellement réduire la probabilité de blocage sur ces réseaux.

2.4.6 Réutilisation des longueurs d'onde

Afin de diminuer le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour accommoder une matrice de trafic donnée, on peut recourir aux réseaux optiques semi sans filtre. On peut estimer que le placement stratégique de filtres bloquant certaines longueurs d'onde permet de considérablement améliorer le rendement de la solution topologique. On réalise ainsi des solutions semi sans filtre (Khanmohamadi et *al.*, 2011).

En effet, les signaux étant filtrés, la contention diminue brutalement sur certaines portions de l'arbre puisque le réemploi en aval des longueurs d'onde bloquées pour d'autres connexions est permis. Propagation passive des transmissions, et réutilisation des longueurs d'onde, en plus de la sélection du signal à la réception entraînent l'idée même de réseaux similaires aux réseaux sans fil.

La figure 2.18 représente un exemple de ce concept (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006). Trois nœuds sont considérés comme placés stratégiquement de façon à morceler le réseau, par exemple en fonction de la demande. A partir de là, on demande à deux de ces nœuds de filtrer (bloquer) une longueur d'onde rouge et le dernier de bloquer une longueur d'onde verte.

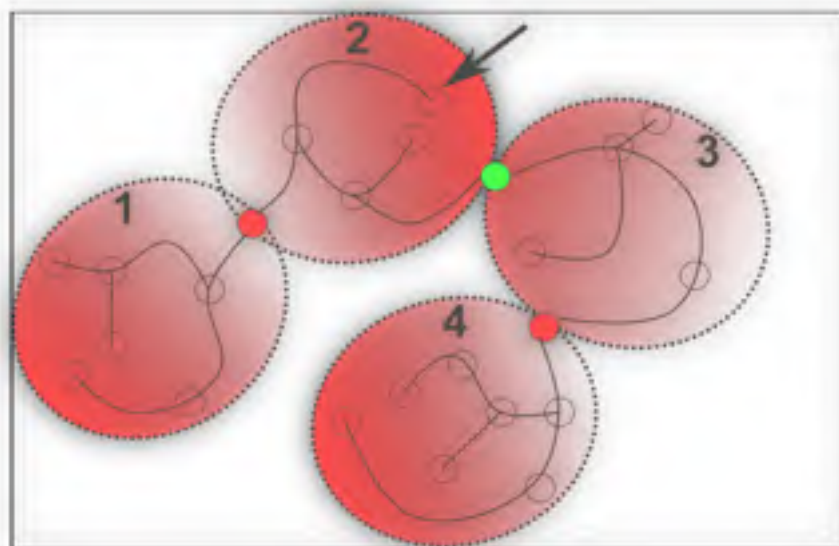


Figure 2.18 Réutilisation des longueurs d'onde dans un réseau optique sans filtre

Ceci permet d'isoler la portée de la longueur d'onde rouge. L'atténuation illustrée dans cette figure montre qu'à mesure que l'on s'éloigne du nœud émetteur de la longueur d'onde (par exemple celui montré par la flèche dans la cellule n°2), alors la probabilité de collision de longueur d'onde augmente. Si le nœud vert ne la filtre pas, alors celle-ci pénètre dans le nœud 3 où elle peut potentiellement être utilisée ou constituer un canal non filtré.

On peut dès lors envisager l'usage exclusif de certaines longueurs d'onde dans des régions données des réseaux sans filtre, hiérarchiser le spectre entre des longueurs d'onde à faible portée (quelques centaines de kilomètres) et à plus grand débit d'une part, et des longueurs d'onde à plus longue portée d'autre part.

De la figure 2.18, on peut donc considérer la longueur d'onde verte comme étant de grande portée entre les cellules 1 et 2 ou 3 et 4, et laisser la longueur d'onde rouge être de courte portée, par exemple à l'intérieur d'une seule cellule. Le concept présente ainsi une lointaine analogie avec les réseaux sans fil où chaque cellule couvre un ensemble de longueurs d'onde

différentes de la cellule voisine afin d'éviter parasitages et collisions. La présence de filtres dans les cellules semi sans filtre peut ambitionner un but similaire.

Les réseaux optiques sans filtre sont particulièrement indépendants à la grille spectrale définie par l'Union Internationale des Télécommunications (ITU), et de ce fait, il y est plus aisé de déployer le concept *gridless* (Lavallée, 2011). En effet, nous avons vu que les diviseurs et combineurs de puissance optique passifs nous permettent de nous affranchir de l'alignement des filtres mis en cascade, et des problèmes afférents.

La figure 2.19 présente un exemple de spectre dont la largeur des canaux est flexible. En comparaison, chaque canal devrait être espacé tous les 50 GHz dans le cas de réseaux optiques actifs.

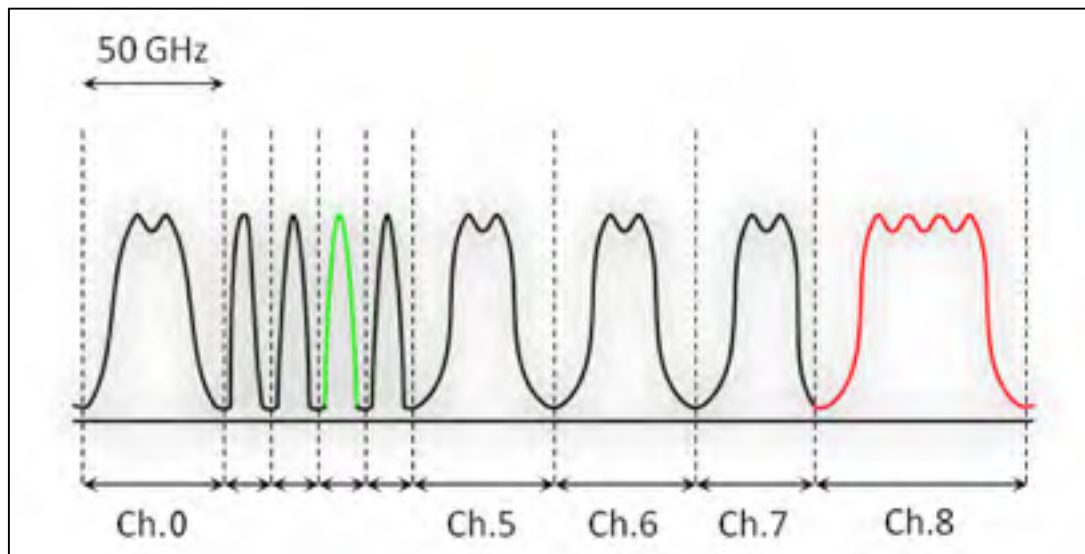


Figure 2.19 Spectre flexible
Tirée de Lavallée (2011)

Dans notre exemple, le canal rouge (en 8) est considéré de courte portée mais de fort débit (100 Gbit/s ou peut être dans un futur proche, 400 Gbit/s). En revanche, le canal vert (en 3) de plus longue portée (par exemple 1500 km), est à plus faible débit, se trouve donc occuper une largeur spectrale moindre et est placé dans une région du spectre adéquate.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques propres des réseaux optiques sans filtre. Nous savons que le remplacement des commutateurs sélectifs en longueur d'onde, actifs, par des diviseurs et des combineurs de puissance optique, passifs, offre les avantages suivants :

- les coûts et la consommation électrique sont réduits;
- il n'y a pas de composant intermédiaire à configurer lors de l'établissement d'un canal;
- on ne dispose pas du problème d'alignement des nombreux filtres mis en cascades. De fait, on peut même envisager de recourir à l'usage d'un spectre optique indépendant de la grille ITU;
- on ne provoque pas non plus de changement majeur de paradigme. Ceci signifie qu'il est possible d'adapter des architectures et concepts des réseaux de future régénération à la notion de réseau sans filtre sans redouter de hausse des coûts d'opération.

La seule ombre au tableau réside dans la passivité même des composants utilisés pour remplacer les commutateurs actifs. Il n'est plus possible dorénavant d'empêcher les collisions de longueur d'onde, ainsi que les boucles lasers susceptibles d'apparaître suite à une erreur humaine, exception faite dans une mesure relative des réseaux optiques semi sans filtre. De fait, il est nécessaire pour le plan de contrôle d'intégrer cette problématique de façon à procéder à l'évitement de toute collision. Ceci fait l'objection de la discussion du chapitre trois. Dans le chapitre quatre, les principes précédemment énoncés sont validés.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION D'UN PLAN DE CONTRÔLE POUR LES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

Dans ce chapitre qui explique plus en détail l'article soumis à la revue au journal IEEE Communications Magazine, nous nous attachons à décrire les points suivants :

- l'architecture du plan de contrôle qui nous paraît la plus appropriée pour un réseau optique sans filtre;
- la gestion des canaux non filtrés. Notamment, nous présentons les algorithmes qui nous permettent de les gérer, par la définition même du concept de ports en amont et en aval;
- la gestion de la détection et de l'évitement des boucles fermées;
- la gestion des changements de topologie et de l'insertion de nouveaux nœuds dans une topologie;
- nous décrivons aussi le simulateur de plan de contrôle optique sans filtre en vue des établissements de connexion.

3.1 Choix de l'architecture de plan de contrôle

3.1.1 Solution centralisée, solution distribuée

Nous rappelons ici succinctement les tendances de l'état de l'art évoquées au chapitre un en ce qui à trait aux architectures de plan de contrôle. Lors de l'établissement d'une nouvelle connexion optique (Salvadori et *al.*, 2009) :

- dans le cas d'une architecture centralisée, un composant spécifique, et accessible par tous les nœuds du réseau, est susceptible d'effectuer le calcul de la route optimale pour la demande d'établissement d'une connexion, en tenant compte de la connaissance complète de l'état du réseau (trafic et distorsions physiques);

- dans le cas d'une architecture distribuée en revanche, les procédures décrites précédemment sont laissées au plan de contrôle lui-même, c'est-à-dire qu'il effectue lui-même le routage et la signalisation.

Dans le cas de GMPLS, le protocole Open Shortest Path First (OSPF) est utilisé pour informer les différents éléments qui participent à la sélection des ressources en vue de l'établissement d'une connexion à partir de l'inventaire des ressources disponibles. Il s'agit d'un protocole qui tient compte de l'état des liens.

A l'aide de ce protocole, il est possible, soit :

- de permettre aux différents nœuds de rafraichir leurs bases de données régulièrement. Dans le cas d'une architecture distribuée, il est vital que les nœuds disposent des informations les plus récentes pour pouvoir établir leurs connexions efficacement (Castoldi et *al.*, 2007);
- de permettre aux différents nœuds d'informer les composants centralisés des ressources disponibles du réseau, ce, pour qu'ils prennent des décisions optimales.

Les solutions distribuées sont décrites (Castoldi et *al.*, 2007) comme rapides et faciles à mesure que le réseau croît en termes de nombre de nœuds par rapport aux solutions centralisées précisément parce qu'elles partagent leurs ressources computationnelles lorsqu'il s'agit de déterminer un chemin à établir, ainsi que les risques de pannes majeures.

3.1.2 Quantité de données de contrôle à échanger

En revanche, ceci nécessite que les bases de données soient bien synchronisées. La moindre contradiction entre les bases de données de deux nœuds différents peut se traduire par des erreurs, ou dans le meilleur des cas, par l'établissement de connexions non nécessairement optimales (Castoldi et *al.*, 2007).

Dans le cas des solutions distribuées, nous pouvons choisir de donner une vue partielle ou totale du réseau pour les nœuds. Dans le premier cas, la quantité de données de contrôle à échanger est plus réduite, mais les nœuds vont baser leurs décisions pour le choix d'une route sur une connaissance réduite. Il s'ensuit une baisse de performance dans ce cas précis (Ramamurthy, Sudipta et Chaudhuri, 2001).

Dans le cas de réseaux transparents enfin, certains algorithmes de routage passent par la connaissance des caractéristiques physiques des liens, qui peuvent, ici aussi, être diffusées par OSPF. On remarque que ces contraintes physiques, utiles à prendre en compte pour valider au préalable une connexion à établir, entraînent une quantité de données de contrôle plus grande pour aviser justement tous ces nœuds.

3.1.3 Routage centralisé, signalisation distribuée et explicite

Plusieurs types de signalisation ont été proposés selon la présence ou non de la contrainte de continuité de longueur d'onde dans l'établissement d'une connexion (Giorgetti, Andriolli, Ruepp et Castoldi, 2010) :

- la signalisation vers l'aval (*Upstream Label scheme*) où les ressources sont mobilisées à mesure que le chemin s'établit. Il s'agit d'une solution particulièrement efficace pour une connexion sans la contrainte de la continuité de la longueur d'onde, pourvu que l'on ne réserve pas trop de longueurs d'onde le temps d'établir le chemin. Autrement, on risquerait d'augmenter le taux de blocage de demandes concurrentes;
- la signalisation vers l'amont (*Label set scheme*) est plus lente, mais permet de sonder au préalable les ressources disponibles avant de demander au nœud destinataire d'effectuer la procédure de réservation sur une longueur d'onde qu'il a choisie.

Cette dernière signalisation serait particulièrement tentante pour les réseaux optiques sans filtre. Toutefois, nous devons tenir compte que l'établissement d'une connexion mobilise des ressources au-delà de la portée de la connexion elle-même :

- à cause des canaux non filtrés,

- à cause des branches combinées des arbres optiques passifs.

Ceci demande une connaissance du réseau plus large dans le cas d'une solution distribuée. Le PCE étant en mesure d'aboutir à une solution optimale grâce à sa vue totale de la topologie, nous proposons l'usage de RSVP avec l'utilisation systématique du champ *Explicit Routing Object* (ERO) (Farel, Ayyangar et Vasseur, 2008). Ceci provoque l'établissement de la connexion sur le chemin même spécifié par le PCE mais de manière distribuée.

3.1.4 Solution retenue pour les réseaux optiques sans filtre

Nous avons vu combien le contrôle des canaux non filtrés est crucial pour maintenir le niveau de performance des réseaux optiques sans filtre. Nous estimons que, de ce fait, il est important de trouver des chemins optimaux de façon à maintenir cette performance. Une connaissance totale du réseau s'impose pour que les composants puissent ainsi choisir les meilleures routes selon la métrique retenue.

Étant donné qu'il s'agit de réseaux transparents, les données comme les taux de dispersion chromatiques et de dispersion modale de polarisation, la quantité de bruit estimée des amplificateurs de ligne, ainsi que la distance des liens sont utiles pour valider une route lors de sa sélection. Il est plus avantageux qu'un plan de contrôle puisse éliminer des routes qui n'offriraient pas la réception des données avec un minimum d'erreurs.

Nous avons donc choisi dans l'article en question (Mantelet, 2012), de recourir à une solution centralisée, d'une part pour la réduction de la quantité de données de contrôle échangées sur le plan de contrôle, mais aussi en tenant compte du fait qu'historiquement, les opérateurs possèdent des composants centralisés pour gérer leur réseau. Notez que ce choix qui nous paraît plus judicieux n'est pas restrictif.

3.2 Choix de l'élément de calcul de chemin

Cugini, Paolucci, Valcarenghi et Castoldi (2007) proposent une solution basée sur un élément de calcul de chemin (PCE). Un *Path Computation Element*, PCE, est un composant dont la

fonction est de sélectionner une route à partir d'un algorithme en fonction des contraintes et des métriques qu'on lui spécifie.

Ce composant générique nous a paru intéressant pour les réseaux optiques sans filtre. En effet, s'il nous est possible de formaliser les règles évoquées dans le chapitre deux et propres à ces réseaux, sous forme d'algorithme, alors il est possible de les insérer directement dans ce composant.

De la même manière, confier à ce composant la fonction spécifique associée à l'établissement des chemins permet aux nœuds, et autres composants du plan de gestion, de déléguer une partie de leur charge. Les PCE peuvent, en effet, être aussi bien utilisés dans les solutions centralisées et distribuées.

Wang et *al.* (2010) a proposé la définition d'un plan de contrôle basé sur deux PCE. Chacun des deux PCE est dédié à une tâche particulière. La première est la sélection même des chemins connaissant l'état du réseau en termes de connexions, bande passante, etc. La deuxième correspond à la validation physique des chemins demandés, en calculant le BER à la réception et en vérifiant qu'il correspond aux exigences du type de trafic demandé.

La figure 3.1 (Mantelet, 2012) illustre la solution retenue pour le plan de contrôle. Chaque nœud du plan de données (A, B, C, D) est muni de transmetteurs, récepteurs etc. ainsi que des interconnexions précédemment évoquées.

Chaque nœud dispose d'un contrôleur de connexion optique (*Optical Connection Controller*, OCC) dans le plan de contrôle. Ceci leur permet à tous de pouvoir accéder au PCE qui effectue le routage (RWA-PCE) par l'intermédiaire du protocole *Path Computation Element Protocol* (PCEP).

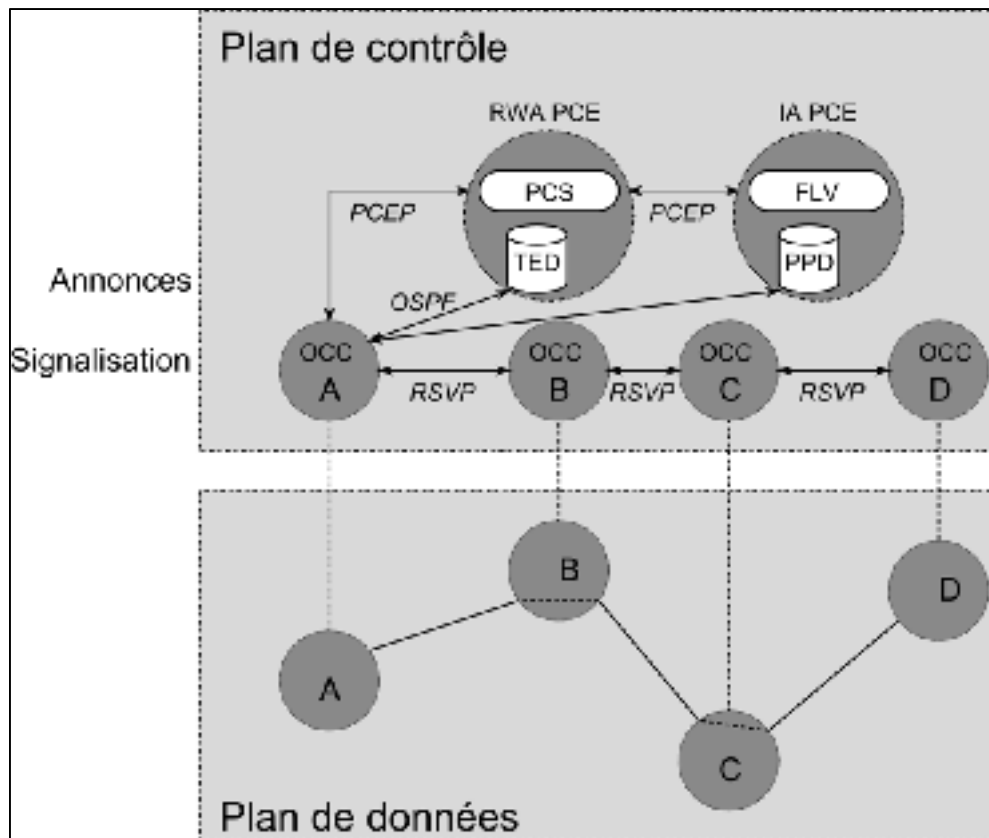


Figure 3.1 Présentation du plan de contrôle
Tirée de Mantelet (2012)

Le protocole OSPF est utilisé par les OCC pour donner aux PCE une vue complète du réseau et régulièrement rafraîchie :

- le RWA-PCE emploie en effet une base de données d'ingénierie de trafic (*Traffic Engineering Database*, TED) qui lui permet à n'importe quel instant de déterminer quels trafics circulent sur le réseau, et quelles en sont leurs caractéristiques;
- le IA-PCE (*Impairment-Aware Path Computation Element*), en charge des propriétés physiques du réseau, collecte les paramètres physiques de chaque lien et nœud, tels la dispersion chromatique par exemple, et les entrepose dans une base de données des paramètres physiques (*Physical Parameter Database*, PPD).

Le protocole *Resource Reservation Protocol* (RSVP) permet aux différents nœuds d'effectuer l'établissement du chemin optique et la mobilisation des ressources associées du plan de données, une fois que le RWA-PCE a produit un résultat.

Le RWA-PCE en effet s'occupe de trouver les routes et d'assigner les longueurs d'onde convenables. Il dispose pour cela d'un solveur de calcul de chemin (*Path Computation Solver*, PCS) et qui contient l'algorithme de routage et d'assignation de longueur d'onde à proprement parler.

Enfin le IA-PCE dispose d'un solveur double. Il contient un algorithme qui permet de valider la connexion physique (*Filterless Link Validator*, FLV), issu des travaux précédents (Tremblay *et al.*, 2010). Le IA-PCE effectue l'estimation du BER pour chaque arbre fourni par le RWA-PCE.

Si aucun BER ne correspond à la qualité de service exigée pour ce type de trafic (QoS), alors le PCE doit embrayer sur un algorithme de compensation dont le but est de proposer une nouvelle configuration – par exemple pour des composants comme les amplificateurs de ligne – de façon à ce que la connexion puisse entrer dans les normes spécifiées.

Si enfin aucune mesure n'est disponible, le IA-PCE conclut qu'aucun arbre proposé ne dispose des critères physiques pour répondre à la demande d'établissement de la connexion, et celle-ci est bloquée.

3.3 Un modèle de plan de contrôle de type *overlay* pour les réseaux optiques sans filtre

Vis-à-vis des couches supérieures, il est possible de proposer plusieurs modèles de plan de contrôle (Koo, Sahin et Subramian, 2004) :

- le modèle *overlay* considère les commutateurs optiques et les routeurs IP comme des composants séparés. Lors de l'établissement d'une connexion, les routeurs extérieurs au

réseau ne participent pas à la stratégie de routage. La couche optique est ainsi transparente pour la couche réseau;

- le modèle de type *peer* intègre à la fois les commutateurs optiques et les routeurs IP. Dans ce type de modèle une connexion peut être gérée par les routeurs source et destination, s'ils sont à l'extérieur du réseau. Ceci nécessite toutefois que les contraintes spécifiques aux réseaux optiques soient connues des routeurs;
- le modèle inter domaine tente de récupérer le meilleur des deux précédents modèles. Les instances de routage des deux couches demeurent séparées mais de l'information (comme les adresses IP distantes) est échangée.

Les réseaux optiques sans filtre disposent de caractéristiques spécifiques qui leur sont difficiles d'échanger au niveau IP sans exiger des extensions dans les standards actuels. C'est pour cette raison que l'on propose un modèle inter domaine.

La figure 3.2 présente ainsi deux réseaux optiques sans filtre répartis sur deux domaines, chaque nuage représentant un domaine. Le plan de contrôle est illustré par les PCE A et B. Chaque PCE a une vue totale de son domaine particulier. Éventuellement, les PCE peuvent communiquer dans le plan de gestion avec un NMS.

Cette figure présente ainsi le déroulement d'une requête issue d'un nœud extérieur aux réseaux optique sans filtre et qui souhaiterait les traverser (à gauche). Par le protocole UNI, le nœud extérieur effectue sa requête, qui est relayée vers le PCE A. Le PCE A, qui dispose d'une vue totale de son réseau, remarque qu'aucun des nœuds de bordure ne peut joindre le nœud distant. Il contacte donc à son tour le PCE B qui répond par l'affirmative.

Le PCE A initie un calcul du chemin, envoie la réponse au nœud de bordure qui effectue une réservation de la longueur d'onde vers l'aval par le moyen de RSVP, muni d'un objet de routage explicite, en émettant un paquet de type *Path*, jusqu'au nœud de l'autre domaine par le protocole NNI, où ce nœud relaie la requête vers le PCE B, qui effectue le calcul du chemin, retourne la réponse.

Ultimement, le nœud de bordure du deuxième domaine effectue la réservation à son tour. Par UNI le nœud distant extérieur aux réseaux sans filtre est contacté (à droite). Si la procédure réussit, alors un message RSVP de type *Resv* est renvoyé directement dans le sens retour jusqu'au nœud distant qui a émis la requête.

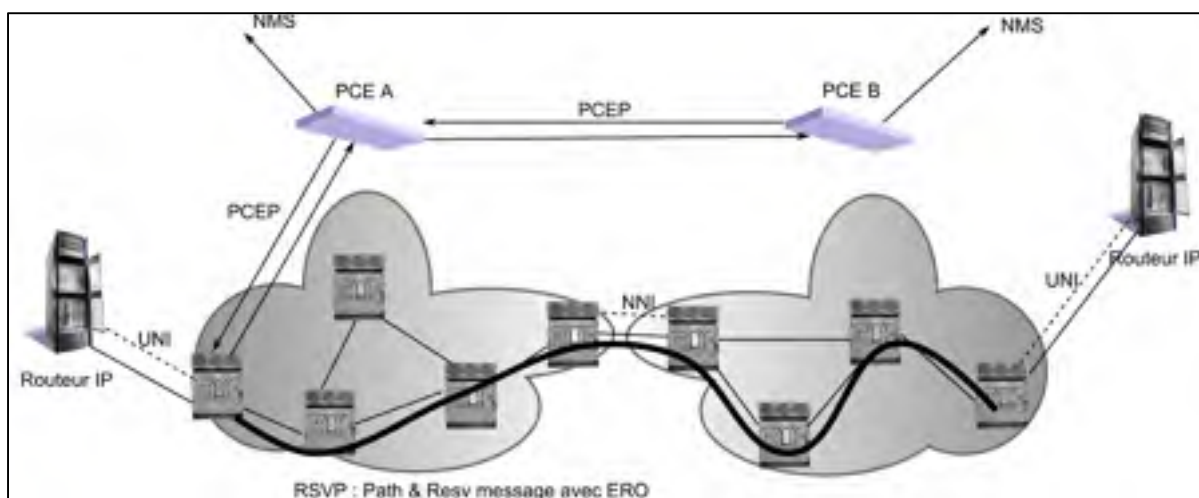


Figure 3.2 Modèle de type inter-domaine pour les réseaux optiques sans filtre

3.4 Détection des boucles laser

Nous remarquons que les phénomènes de boucles laser, ainsi que les interférences issues de branches divisées puis recombinaison, ne revêtent un caractère potentiellement délétère qu'à partir du moment où l'on crée, quelque part dans la topologie, une connexion avec un port de sortie dans le premier cas, et une combinaison dans le second. Ceci fait l'objet des discussions de la suite de cette section.

Dans Mantelet (2012), nous évoquons qu'il est possible de bâtir un graphe du réseau, constitué des tables d'interconnexion entre les nœuds et des interconnexions passives à l'intérieur des nœuds, pour le PCE. Ceci peut être fait par les algorithmes qui seront décrits par la suite, en plus des mécanismes conventionnels d'information par des protocoles comme OPSF-TE. En effet, lors du parcours d'un arbre si le PCE détecte qu'il passe une seconde fois

par le même port un même arbre, alors il est confronté, soit à une boucle laser, soit à une recombinaison de deux branches divisées, provoquant une interférence.

3.4.1 Canal de contrôle régénéré à chaque nœud

Pour éviter tout risque d'erreur portant sur le canal de contrôle lui-même, celui-ci devra être régénéré à chaque nœud. La régénération systématique du canal de contrôle à chaque nœud présente de très nombreux avantages :

1. La diminution de la charge de trafic. En effet, dans le cas contraire, les données y seraient ajoutées passivement ce qui se traduirait par une accumulation des données sur le plan de contrôle, le long de l'arbre optique passif;
2. Les stratégies d'accès au médium y sont simplifiées. Il n'est plus besoin de tenter une synchronisation des composants pour éviter des collisions sur le canal de contrôle, sur ce qui se traduirait être un bus de 1500 km de long;
3. Le système se trouve ainsi détaché de la topologie du plan de transmission, même si elle n'est qu'hors bande et utilise les mêmes fibres optiques. On garantit ainsi qu'en cas d'erreur humaine, au moins le plan de contrôle fonctionne. Il n'existe plus de risque de boucles laser pour ce canal de contrôle;
4. Enfin, les adjacences et mécanismes de contrôle se trouvent être exactement les mêmes que si le réseau était actif. D'où l'absence d'extension afférente sur les procédés d'exploitation actuels de ces réseaux.

Donc, le plan de contrôle d'un réseau optique sans filtre, en ce qui à trait à sa façon d'opérer (amorçage, découverte du voisinage etc.) demeure le même que pour un réseau filtré.

3.4.2 Port de sortie déconnecté

Deux cas généraux d'erreurs peuvent être retenus dans une erreur manuelle lors de l'installation des interconnexions :

- la formation de boucles laser,
- des signaux qui ne se rendent pas à bonne destination.

Dans le premier cas, les interférences (ou aussi des collisions de longueur d'onde) interviennent au moment même de la combinaison, alors que dans le second elles sont susceptibles d'intervenir à n'importe quel endroit du réseau. Nous rappelons aussi que dans le cas de l'insertion d'un nouveau nœud par exemple, l'erreur prend effet immédiatement, même si le nœud n'a pas été encore configuré (i.e. établissement des chemins etc.).

La figure 3.3 est une reprise de la figure 2.6. Notez que les détails y sont présentés dans la section 2.2.3. Il s'agit d'un nœud possédant quatre interfaces, soit quatre ports d'entrée et quatre ports de sortie, les amplificateurs sont inclus dans les ports, et les lignes figurent les fibres optiques. Les interconnexions présentes au centre montrent par exemple que le port de sortie en haut à droite combine les signaux issus des ports d'entrée en bas à gauche et en haut à gauche.

Les traits en gras illustrent ainsi le passage de ces signaux, de ces deux ports d'entrée vers le combineur de puissance optique passif, figuré par la boîte munie d'une lettre sigma, avant leur combinaison sur la fibre optique de sortie, illustrée en gras et en pointillé. Par la suite, nous appellerons cette fibre optique, la fibre de combinaison.

Dès lors, nous recommandons que dès qu'une intervention humaine porte sur un nœud, il est nécessaire de toujours déconnecter la fibre de combinaison de la figure 3.3 pour chaque port sur lequel on ajoute, retire ou modifie des interconnexions. De ce fait, on ne risque pas de propager des erreurs sur le reste des arbres passifs comme nous l'avons vu dans le chapitre deux.

En déconnectant cette fibre de combinaison et en laissant le nœud faire la découverte de ses interconnexions, puis les communiquer au plan de contrôle de façon à recevoir une validation, avant de pouvoir reconnecter la fibre de combinaison, nous nous garantissons d'éviter tout risque de collision. Par ailleurs, lorsque le système est en opération, il n'y a plus

de risque d'interférence, de collision de longueur d'onde ou de boucle laser liée à une erreur humaine.

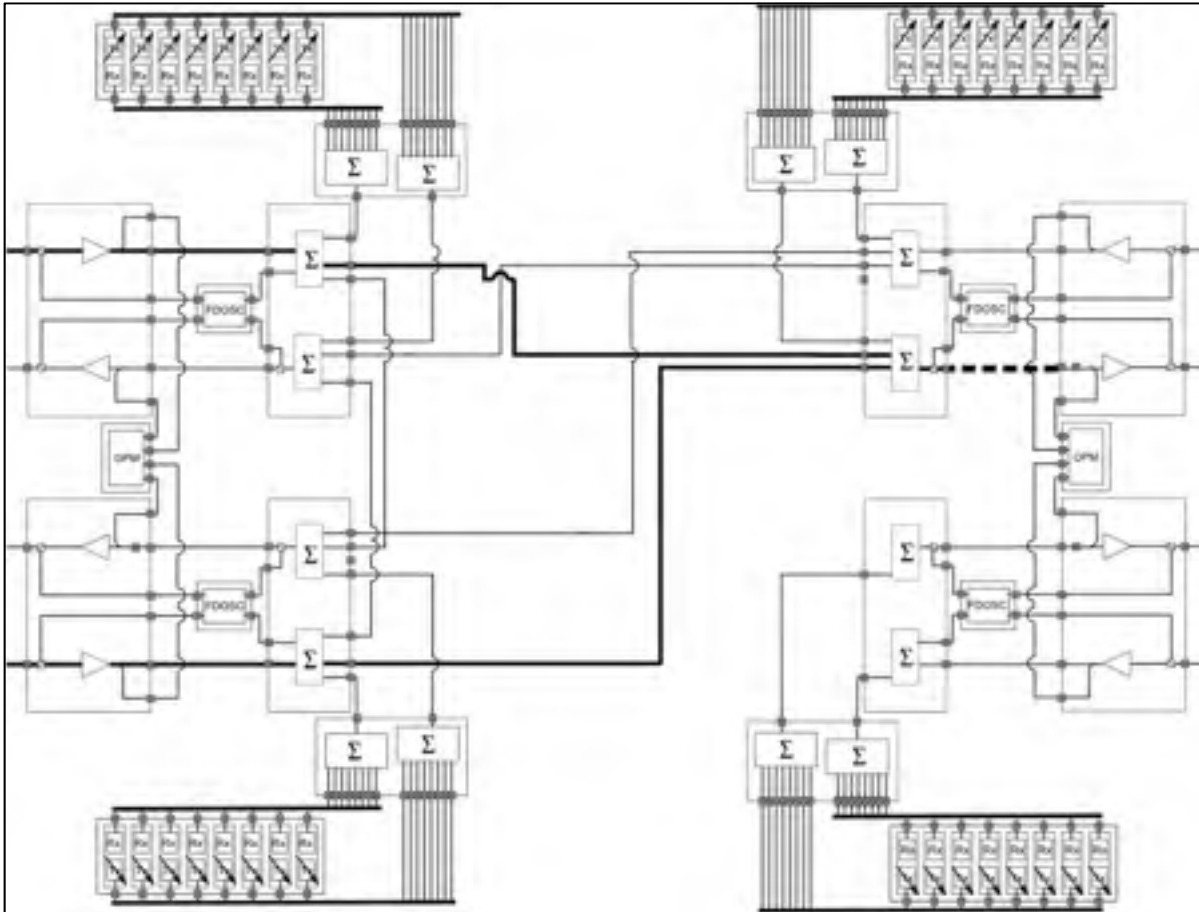


Figure 3.3 Interférences, boucles et collisions susceptibles de survenir sur le lien en pointillé dues à la combinaison des deux liens en gras

3.4.3 Découverte du voisinage interne

Il reste donc à faire en sorte que le plan de contrôle puisse découvrir par lui-même qu'il y a un risque de bouclage. Le brevet de Jean Luc Archambault (2011) offre une solution pour les réseaux à base de WSS. Nous déduisons que ce brevet peut être employé pour les réseaux optiques sans filtre, par la découverte des connexions internes au nœud.

La figure 3.4 reprend les figures 3.3 et 2.6. Le composant de gestion du canal de contrôle sans filtre (FDOSC) est l'élément du plan de contrôle qui permet de découvrir la topologie interne d'un nœud.

Pour cela, la longueur d'onde qui permet d'échanger les données du plan de contrôle, l'OSC est extraite à chaque port d'entrée, puis réinsérée au port de sortie. Son étendue (*scope*) se limite donc dans la section grisée de la figure 3.4. Nous remarquons aussi que le FDOSC constitue le point de démarcation entre l'OSC et la topologie interne.

L'OSC ayant été extrait, la longueur d'onde qui y était associée est donc libre pour l'intérieur de la topologie. C'est pour cela qu'il est proposé que le composant de gestion du canal de contrôle (FDOSC) réinjecte un signal de contrôle à l'intérieur de la topologie.

Les liens en gras montrent les fibres optiques parcourues par la longueur d'onde associée au contrôle (OSC d'une part, puis, pour l'intérieur du nœud). Le combineur de puissance optique passif présent au port de sortie est en outre muni d'un filtre de façon à rediriger le canal de contrôle vers le FDOSC, et l'empêcher de « fuiter » sur la fibre de combinaison, et donc (cf. figure 3.4) d'entrer en collision avec l'OSC au niveau du port de sortie.

Notez que le port 4 détecte de cette manière qu'il n'est connecté à aucun nœud. En effet, le signal interne issu de son FDOSC ne sera détecté d'aucun autre FDOSC situé sur un des trois autres ports, pas plus que son FDOSC ne sera capable de détecter le moindre signal de contrôle interne.

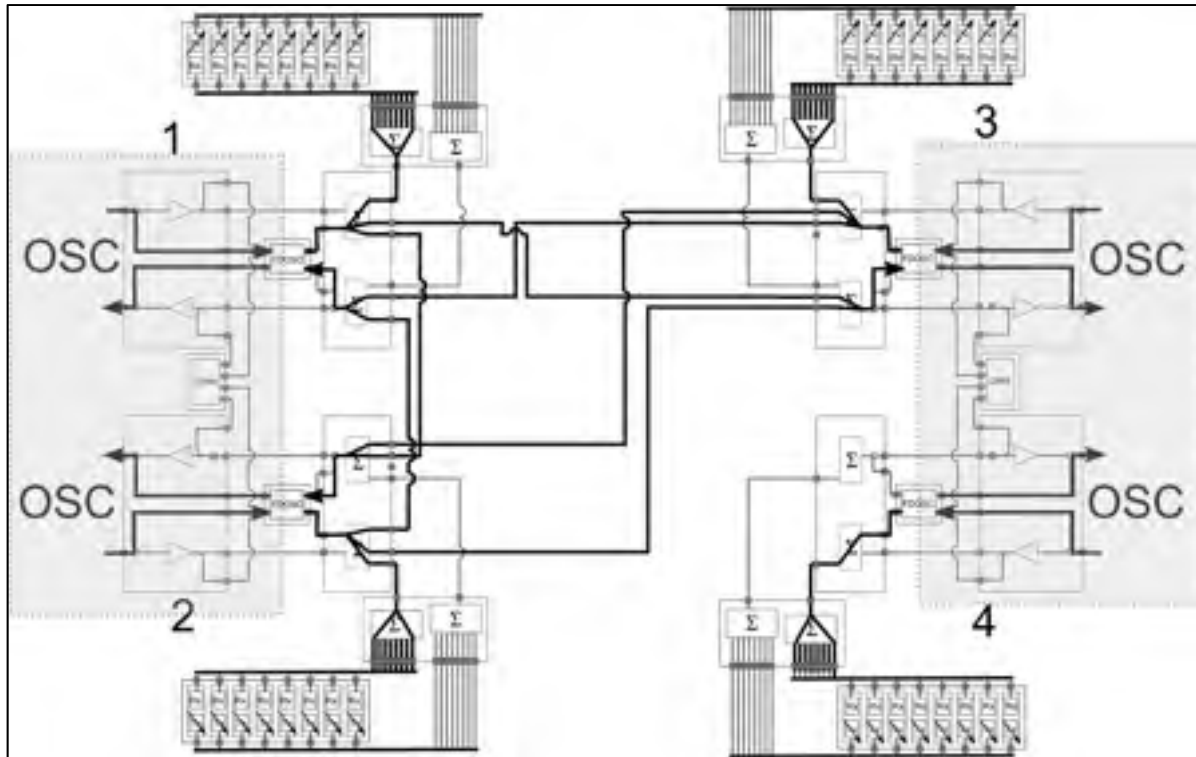


Figure 3.4 Éléments de découverte de voisinage vers l'intérieur du nœud

L'algorithme 3.1 permet au nœud de découvrir sa propre topologie interne avant de pouvoir l'envoyer au PCE par l'intermédiaire d'OSPF.

L'algorithme 3.1 permet au FDOSC de contrôler directement les diviseurs et combineurs de puissance optique passifs (Mantelet, 2012). Il n'y a donc pas nécessité à amener du contrôle dans les modules qui les contiendrait. De plus, le système fonctionne en continu, il est à même de gérer et de surveiller l'état des interconnexions dans le nœud et d'estimer les pertes associées au franchissement du nœud en vue d'asservir l'amplificateur du port de sortie.

Cet algorithme boucle sur lui-même. De fait, la convergence ne peut être assurée. Ceci lui permet d'effectuer une veille en temps réel et de revenir régulièrement à un état où il peut redécouvrir la topologie interne. Si l'on veut une validation ponctuelle, alors la convergence est assurée à la condition d'omettre la ligne 11 de l'algorithme proposé.

Algorithme 3.1 Procédé de veille à la découverte des interconnexions

Procédé de veille à la découverte des interconnexions

Entrée : Une table des interconnexions vide

Sortie : Une table rendant compte des interconnexions entre les ports du nœud

- 1 Initialiser la table des interconnexions
- 2 **Pour** chaque port faire :
- 3 Assigner un identifiant au FDOSC
- 4 **Pour** chaque FDOSC identifié faire :
- 5 Allumer le laser du FDOSC dans la topologie interne du nœud à P_{Tx}
- 6 Basculer tous les autres FDOSC en mode réception
- 7 Attendre la mesure P_{Rx} de tous les autres FDOSC
- 8 Éteindre le laser du FDOSC
- 9 Rafraichir la table si nécessaire avec les n-uplets
 <Identifiant FDOSC récepteur, {liste des FDOSC émetteurs connectés}>
- 10 La différence $P_{Tx}-P_{Rx}$ peut permettre d'asservir l'amplificateur du port de sortie
- 11 Revenir à 4 régulièrement (ce à des fins de contrôle automatique)

3.4.4 Découverte du voisinage et insertion d'un nouveau nœud

Nous proposons l'algorithme 3.2 pour s'affranchir d'un risque d'effondrement de la topologie, lorsqu'un nouveau nœud est ajouté avec une erreur, en se reposant sur un plan de contrôle intelligent et dynamique.

A partir d'ici, nous estimons que le PCE dispose de la nouvelle topologie et est en mesure d'effectuer tous ses calculs proprement lors de la demande d'établissement d'un nouveau canal.

Algorithme 3.2 Procédé d'installation d'un nouveau nœud

Procédé d'installation d'un nouveau nœud**Entrée :** Un nœud dont la topologie interne est incertaine**Sortie :** Un nœud dont la topologie est validée ou rejetée par le réseau

- 1 Placer les interconnexions
- 2 Connecter les ports aux liens optiques, déconnecter les fibres de combinaison
- 3 Laisser le nœud s'enregistrer sur le plan de contrôle (i.e. découverte du voisinage)
- 4 Laisser le nœud découvrir sa topologie interne (cf. Algorithme 3.1)
- 5 Laisser le nœud donner sa table des interconnexions au plan de contrôle
- 6 **Si** le nœud obtient une réponse favorable :
 - 7 Connecter les fibres de combinaison
- 8 **Sinon** :
 - 9 Revenir à 1

3.4.5 Procédé de mise à jour de la topologie

Dans le cas éventuel où la maintenance souhaiterait modifier une topologie fonctionnelle, il faut prendre en compte que la procédure précédemment citée provoque l'arrêt des transmissions au niveau des ports de sortie. L'algorithme 3.2 peut être réutilisé pour effectuer un procédé pour un changement de configuration d'un nœud sans provoquer l'effondrement du réseau.

De la même manière que pour l'algorithme 3.1, cet algorithme peut obtenir une convergence ponctuelle si on omet la ligne 8. Si le résultat est négatif, c'est-à-dire que le nœud n'obtient pas de réponse favorable, parce qu'une boucle a été détectée par exemple, alors on ne doit pas connecter les fibres de combinaison.

3.5 Routage, assignation de longueur d'onde et gestion des canaux non filtrés

Plusieurs approches de routage sont possibles pour accommoder une matrice de trafic particulière. Il s'agit tout d'abord de savoir si l'on procède de manière statique (Koo, 2004), c'est-à-dire que l'on connaît à l'avance la matrice, ou non.

Des travaux précédents ont apporté des solutions *off-line* qui aboutissent à des performances optimales (Archambault, 2008), (Enriquez, 2010). Dans le cas du routage dynamique, on peut toutefois envisager :

1. Le routage fixe, dépendant d'une métrique comme la distance et aboutissant toujours au même chemin pour une paire constituée d'un nœud émetteur et d'un nœud récepteur donné, quel que soit l'état du réseau, dont sa charge. L'exemple le plus classique est l'algorithme de Dijkstra;
2. Le routage fixe alterné consiste à maintenir plusieurs routes possibles, ce qui permet d'éviter un blocage lié à la raréfaction des longueurs d'onde sur une route de prédilection en utilisant une autre moins populaire;
3. Le routage adaptatif enfin se traduit par le choix dynamique d'une route en fonction de l'état du réseau. Cette solution plus efficace demande une meilleure coordination du plan de contrôle et plus de ressources de calcul.

A cela, on ajoute le besoin de tenir en compte les contraintes physiques de façon à ce que le réseau ne choisisse un chemin tout simplement impossible à établir. L'un des attraits des réseaux optiques passifs est le fait que le choix d'une route se traduit par le choix d'un arbre, soit le choix d'un domaine de diffusion. A terme, ceci se traduit par une réduction de la consommation en ressources de processeur.

Nous ajoutons à cela les particularités spécifiques des réseaux optiques sans filtre, à savoir la prise en compte des canaux non filtrés, c'est à dire de l'existence de longueurs d'onde transitant sur des parties du réseau au-delà de l'étendue (*scope*) du chemin optique.

3.5.1 Caractéristiques des réseaux optiques passifs

Nous avons vu dans le chapitre deux que les transmissions ont tendance à se propager au-delà de leur étendue, c'est-à-dire qu'au franchissement des destinataires, elles continuent de se propager si l'arbre se poursuit, car elles ne sont pas bloquées par les composants optiques passifs.

Le cadre d'un arbre optique passif dépasse le concept de lien ou de chemin dans la stratégie de routage à proprement parler. Il s'agit bien à proprement parler d'un bus passif optique multipoint à multipoint, ou encore d'une structure de diffusion à grande échelle. De ce fait, il faut considérer l'arbre (parfois au complet) lorsque l'on veut établir une connexion optique.

Par exemple, les composants de calcul du plan de contrôle, tels le PCE, doivent maintenir une table des arbres passifs avec un identifiant particulier, et ce de façon à toujours garder en mémoire le risque de collision de longueurs d'onde qui peut y survenir.

Par ailleurs, ces pseudos bus passifs ont une forte tendance à créer une adjacence physique directe entre tous les nœuds du réseau. Dans un arbre, en effet les nœuds traversés pris deux à deux ont leurs interfaces directement connectées. De ce fait, dans le cas d'un routage des signaux en un seul saut, il est toujours possible de trouver au moins une paire nœud émetteur et nœud destinataire dans le réseau avec leurs interfaces directement connectées (Archambault, 2008). Le routage est extrêmement rapide une fois que le PCE a bâti une vue de son réseau, puisqu'il consiste à choisir parmi un nombre relativement réduit d'arbres le meilleur d'entre eux.

3.5.2 Règles sur le choix d'un arbre et de la sélection de la longueur d'onde

3.5.2.1 Définition des ports émetteurs en amont et en aval

Dans l'article soumis à la revue au journal IEEE Communications Magazine (Mantelet, 2012), nous proposons la définition des ports émetteurs en amont et en aval. Chaque fois qu'un nœud veut émettre sur un port, le PCE doit concaténer toutes les longueurs d'onde

utilisées par tous les ports émetteurs en amont et les ports en aval de ce port. Ceci permet d'éviter toute collision entre signaux, et permet en outre de déterminer et de gérer la présence des canaux non filtrés. Le concept est illustré à la figure 3.5.

Par exemple à la figure 3.5, le nœud 2 veut établir une nouvelle connexion avec le nœud 5. Pour ce faire, le port pointé par la flèche est l'interface la plus appropriée. Pour déterminer quelle longueur d'onde est disponible, il faut déterminer les ports émetteurs en amont et les ports émetteurs en aval.

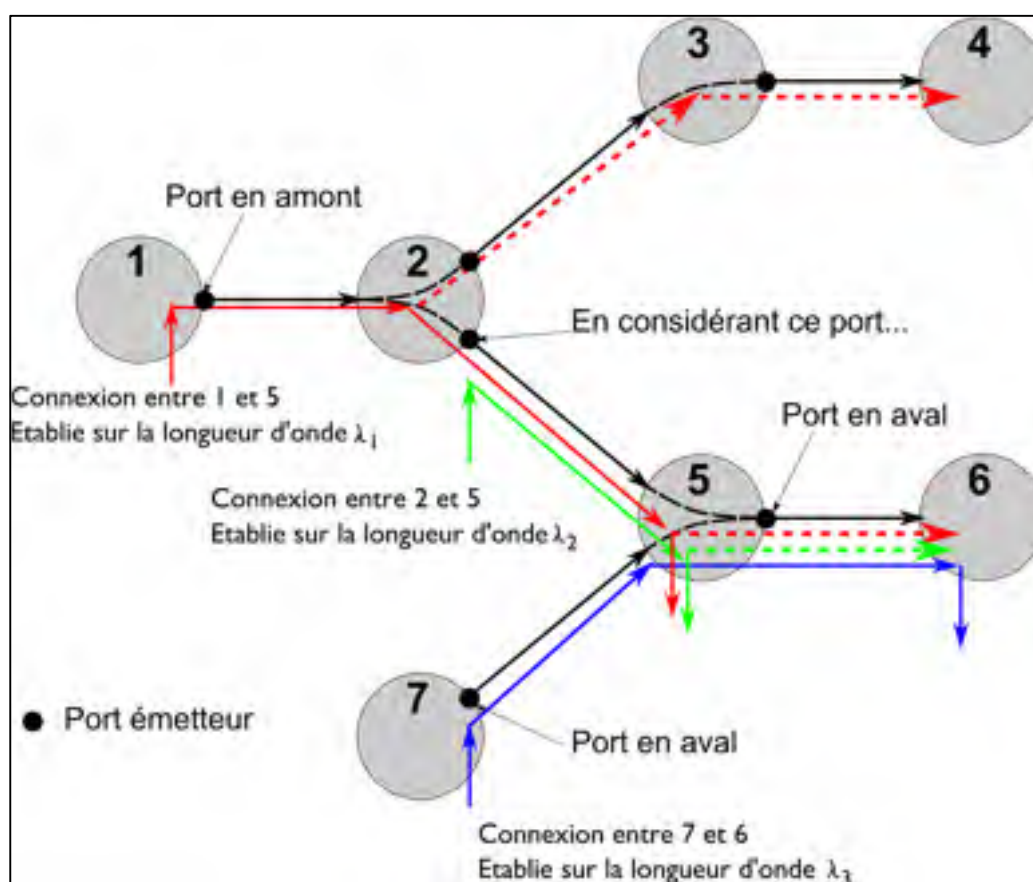


Figure 3.5 Concept de port en amont et de port en aval,
Tirée de Mantelet (2012, p. 3)

Nous remarquons que le nœud 1 dispose d'un port émetteur en amont, et que celui-ci opère à la longueur d'onde λ_1 . Nous remarquons aussi que le nœud 7 dispose d'un nœud émetteur en aval opérant à λ_3 .

De là, le PCE concatène et constate que λ_1 , λ_2 et λ_3 sont occupées. Il suffit de prendre le complémentaire sur le spectre pour déterminer que λ_4 , λ_5 , λ_6 etc. sont disponibles pour ce port et qu'il n'y aura pas de collision.

Nous remarquons que pour cela, il est important que les interconnexions soient détectées et véhiculées par OSPF de façon à ce que le PCE puisse déterminer ces ports émetteurs en amont et en aval. Sans cela, il sera incapable de procéder.

3.5.2.2 Gestion de la sélection des longueurs d'onde pour éviter les collisions de longueur d'onde

A partir de la connaissance des nœuds émetteurs en amont et en aval, il est possible au PCE d'appliquer les règles suivantes pour s'affranchir de toute collision :

1. Deux ports ne peuvent pas utiliser les mêmes longueurs d'onde si l'un est en amont de l'autre (i.e. port des nœuds 1 et 2 dans la figure 3.5);
2. Deux ports ne peuvent pas utiliser les mêmes longueurs d'onde s'ils ont des ports émetteurs en aval communs avec lesquels ils disposent d'une connexion (par exemple les nœuds 2 et 7 vers le nœud 5 dans la figure 3.5). Nous précisons que la combinaison est effectuée au port émetteur ce qui est un cas de figure particulier présent dans Savoie (2010);
3. Deux ports peuvent utiliser les mêmes longueurs d'onde s'ils n'ont pas de port émetteur en aval de commun (c'est-à-dire qu'ils appartiennent à deux branches distinctes d'un arbre optique passif, comme les nœuds 3 et 5 vers 4 et 6 respectivement dans la figure 3.5).

3.5.2.3 Algorithme de détermination des ports émetteurs en amont et en aval

Dans cette section, nous dévoilons les algorithmes qui permettent au PCE de déterminer quels sont les ports émetteurs en amont et en aval pour n'importe quel port du réseau sur lequel il a une vue. Cet algorithme fonctionne en deux temps comme le montre la figure 3.6.

Dans un premier temps, l'algorithme cherche tous les ports émetteurs en aval (en rouge) du port considéré, ce qui lui permet de valider la règle 1 de la section précédente. Puis, pour chaque nœud émetteur en aval, il remonte afin de déterminer tous les ports émetteurs en amont (en vert), ce qui permettra au PCE d'inclure les règles 1 et 2 de la section précédente. De cette façon, le PCE est en mesure de déterminer toutes les branches qui vont se combiner en aval du port considéré. Tous les ports ignorés (en bleu) permettent de valider la règle 3 de la section précédente.

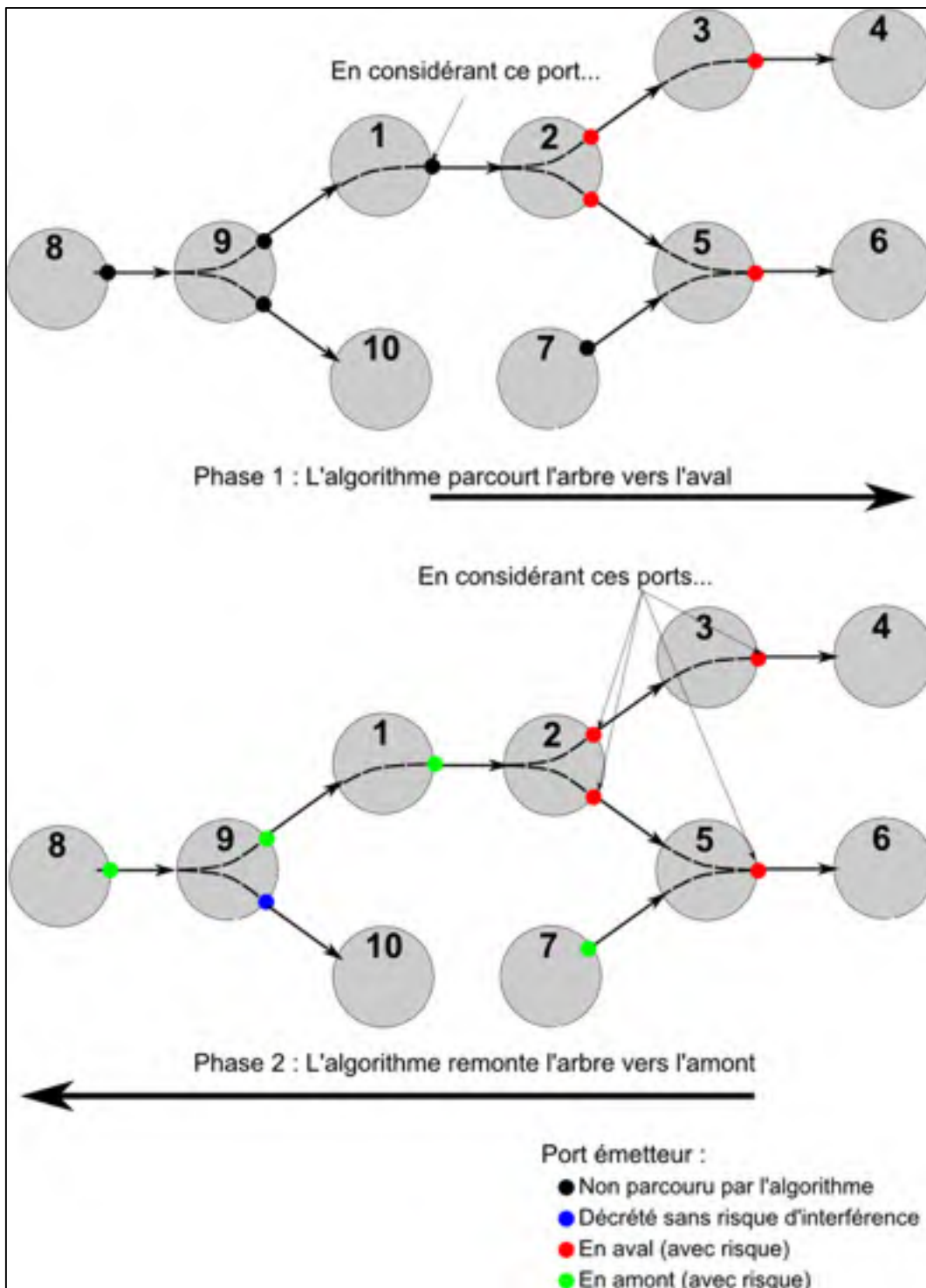


Figure 3.6 Algorithme en deux temps de parcours d'un arbre optique sans filtre pour déterminer les nœuds émetteurs en aval (en haut, phase 1) et en amont (en bas, phase 2)

On voit bien que dans l'exemple de la figure 3.6, le seul port qui ne risque pas d'entraîner de collision avec le port du nœud 1 considéré est bien le port bleu du nœud 9.

Il faut un total de quatre algorithmes pour permettre de bâtir un domaine de collision pour un port de sortie donné compte tenu des règles précédemment établies. Nous les présentons ici, puis en reprenant la figure 3.6, nous l'expliquons. L'algorithme 3.3 permet de retourner un nœud distant. Nous estimons qu'à l'aide d'OSPF, chaque nœud, à l'issue de la découverte du voisinage, est en mesure de dire quel est le port directement adjacent à son port.

Algorithme 3.3 Retourner le port distant d'un lien optique

Retourner le port distant d'un lien optique

Entrée : Une table présentant la vue du réseau, le port pour lequel on souhaite obtenir le port distant (*on-link*)

Sortie : Le port distant de ce port sur le lien optique considéré

1 Compte tenu du port donné en paramètre

2 **Pour** tous les liens (entrées) de la table présentant la vue du réseau

3 **Si** l'entrée possède l'occurrence du port donné en paramètre

4 Retourner le deuxième port de l'entrée

5 Lever une exception

Dès lors, le PCE peut maintenir une base de donnée avec les n-uplets suivants : <Identifiant de lien, identifiant du port émetteur, identifiant du port récepteur> pour chaque lien unidirectionnel. Il suffit de fournir un des deux ports pour que l'algorithme 3.4 retourne l'autre.

Les algorithmes 3.4 et 3.5 permettent de retourner les listes de ports directement interconnectés. Ils sont donc les équivalents à l'intérieur du nœud de l'algorithme 3.3. Le premier donne la liste des ports émetteurs pour un port récepteur donné, alors que le dernier retourne la liste des ports récepteurs pour un port émetteur donné.

Algorithme 3.4 Retourner les ports émetteurs interconnectés

Retourner les ports émetteurs interconnectés

Entrée : Disposer de la table des interconnexions du nœud considéré, et du port récepteur pour lequel on souhaite obtenir la liste des ports émetteurs interconnectés

Sortie : La liste des ports émetteurs en question

1 Compte tenu du port de réception donné en paramètre

2 **Pour** tous les identifiants des FDOSC récepteurs de la table des interconnexions

3 **Si** la clé possède l'occurrence du port donné en paramètre

4 Retourner la liste des ports émetteurs associée à cette clé

De la même manière, il est impératif que les nœuds puissent déterminer comment ils sont interconnectés pour aider le PCE à maintenir une base de données avec les n-uplets suivant <Identifiant du nœud, identifiant du port de réception, {liste des identifiants des ports d'émissions interconnectés à ce port de réception}>. Notez que la clé mentionnée de ce n-uplet est l'identifiant du port de réception, et la valeur est la liste entre accolades.

Algorithme 3.5 Retourner les ports récepteurs interconnectés

Retourner les ports récepteurs interconnectés

Entrée : Disposer de la table des interconnexions du nœud considéré, et du port émetteur pour lequel on souhaite obtenir la liste des ports récepteurs interconnectés

Sortie : La liste des ports récepteurs en question

1 Compte tenu du port émetteur donné en paramètre

2 Créer une liste vide des ports récepteurs

2 **Pour** tous les identifiants des FDOSC récepteurs de la table des interconnexions

3 **Si** la liste associée à la clé possède l'occurrence du port donné en paramètre

4 Ajouter la clé (l'identifiant du port récepteur) à la liste des ports récepteurs

5 Retourner la liste des ports récepteurs

L'algorithme 3.6 exploite les trois premiers algorithmes précédemment mentionnés. Il est récursif, c'est-à-dire qu'à chaque fois qu'un port émetteur en aval est trouvé, il faut retrouver tous les ports émetteurs en aval de ce dernier et ainsi de suite. La procédure est identique pour la deuxième phase. Le parcours de l'arbre est exhaustif.

Algorithme 3.6 Retourner les ports émetteurs en aval et en amont

Retourner les ports émetteurs en aval et en amont

Entrée : Une table de tous les liens optiques entre les nœuds, toutes les tables d'interconnexion de chaque nœud, ainsi que le port émetteur pour lequel on veut démarrer l'algorithme

Sortie : La liste des ports émetteurs en aval et en amont

- 1 Compte tenu du port P émetteur donné en paramètre
- 2 Créer une liste vide des ports émetteurs en aval A1
- 3 Exécuter l'algorithme 3.4 pour ce port P
- 4 Exécuter l'algorithme 3.5 pour le port obtenu en 3
- 5 **Pour** chaque port obtenu en 4, faire :
 - 6 Ajouter ce port dans A1 et aller à 3 de manière récursive
- 7 Créer une liste vide des ports émetteurs en aval A2
- 8 **Pour** chaque port de A1, faire :
 - 9 Exécuter l'algorithme 3.6
 - 10 Exécuter l'algorithme 3.4 du port obtenu en 9
 - 11 Si le port obtenu en 10 n'est pas dans A2
 - 12 L'ajouter à A2 et aller à 9 de manière récursive
- 13 Retourner la concaténation A1 U A2

La figure 3.7 reprend la figure 3.6. Elle sert d'illustration pour la mise en avant de l'algorithme en deux temps. Les ports sont numérotés selon qu'ils sont émetteurs (E) ou récepteurs (R).

Considérant le port E4, et mettant en avant l'algorithme 3.6, en commençant par le parcours de l'arbre vers l'aval, alors via l'algorithme 3.4 et la table des connexions, nous savons que le port distant de E4 est le port numéro R4.

En utilisant l'algorithme 3.4 et la table des interconnexions, nous voyons que dans le nœud 2, les ports émetteurs attachés au port R4 sont les ports E5 et E6. E5 est inclus dans A1, et l'algorithme 3.3 nous donne un port R5 distant de E5. L'algorithme 3.4 donne le port E7 comme résultat, et celui-ci est inclus dans A1. Cette branche se termine vite car l'algorithme 3.3 donne un port R7 distant de E7, mais à la clé correspondante est retourné un ensemble vide. Alors, récursivement, l'algorithme passe à E6, qu'il inclut dans A1 et poursuit de la même manière son opération.

À la fin, les ports E5, E6, E7, et E8 sont déclarés port en aval du port E4 (cf. figure 3.6). Ils sont donc tous susceptibles de provoquer des collisions de longueur d'onde avec toute connexion du port E4 même s'ils ne sont pas dans son chemin optique, en vertu de la première règle isolée dans la section 3.5.2.2.

Lors de la deuxième étape, l'algorithme 3.6 remonte l'arbre à partir des quatre ports isolés précédemment. Pour le port E8 par exemple, l'algorithme 3.5 isole deux clés pour lesquelles E8 apparaît dans la table des interconnexions : R6 et R9. En commençant par R6 et en appliquant l'algorithme 3.3, le port correspondant E6 est inclus dans A2, et la succession des algorithmes 3.5 et 3.3 permet d'inclure successivement E4, E2, E1 dans la liste A2, puis E9 par récursivité à partir de R9. L'opération est ensuite exécutée sur les ports E5, E6, et E7.

En vertu de cette phase, les ports E5, E6, E9, E4, E2, E3 et E1 sont déclarés en amont du port E4. Lors de la concaténation, les ports redondants sont supprimés. Il s'agit des ports E5 et E6. Le port E4 est considéré en amont de lui-même. Cette décision en effet est utile au PCE pour le choix d'une longueur d'onde puisque toute connexion ultérieure est susceptible d'entrer en collision avec les connexions préalable sur ce port même.

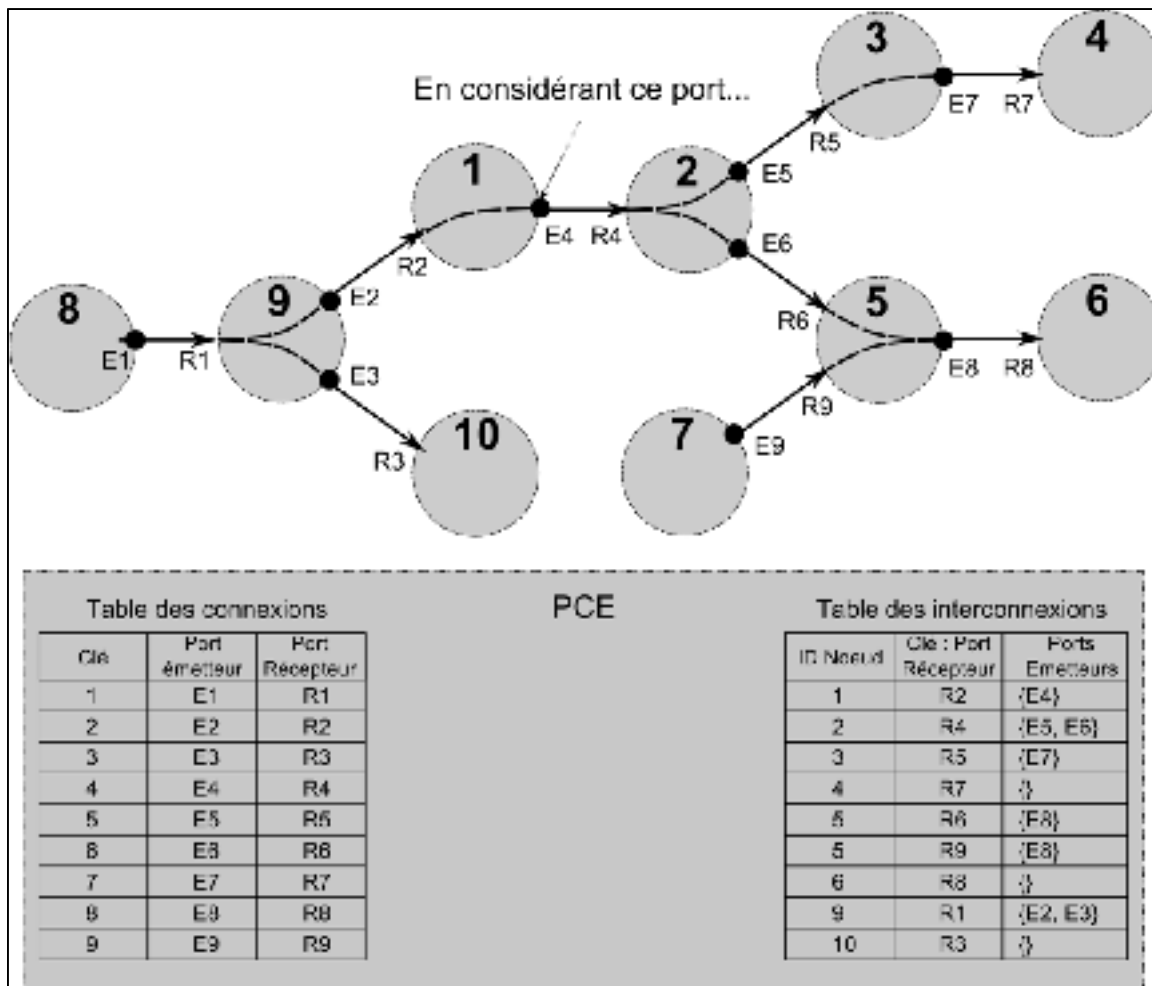


Figure 3.7 Exemple de détermination des ports émetteurs en amont et en aval

Notez que cet algorithme de parcours permet aussi de bâtir dans la foulée la liste des ports récepteurs accessibles en aval d'un port émetteur donné. Cette étape que nous avons omise à fin de clarté est cruciale pour la section suivante. En effet, le PCE est en mesure de connaître dans la foulée quels sont les ports accessibles à un port donné, pour le choix de la route.

3.5.3 Routage par arbre

Moyennant les tables de connexion et d'interconnexion, il est facile pour le PCE de bâtir les arbres optiques sans filtre en utilisant des algorithmes de parcours en profondeur ou en largeur.

Lorsqu'une demande de connexion est établie, le PCE parcourt la liste des ports émetteurs et, à l'aide de la table des adjacences (cf. Algorithme 3.7), il vérifie que le port émetteur est en mesure d'atteindre un des ports récepteurs des nœuds destinataires.

Algorithme 3.7 Routage par arbre optique sans filtre

Retourner les ports émetteurs en aval et en amont

Entrée : Les nœuds source et destinataire, une vue du réseau, et les tables qui peuvent être construites par l'algorithme 3.7.

Sortie : L'arbre pour lequel la métrique est la plus faible, donc implicitement le port source et le port destinataire choisis

1 Considérant le nœud source S et le nœud destinataire D

2 Construire une liste des identifiants des arbres potentiels L

3 Collecter la liste des ports sources de S, et la liste des ports destinataires de D

4 **Pour** chaque port source trouvé, faire :

5 **Si** l'algorithme 3.7 retourne un port accessible qui est un port destinataire de D

6 Inclure l'arbre rattaché à ce port de S dans L

7 **Pour** chaque arbre trouvé, faire :

8 Sélectionner celui dont la métrique est la plus faible

L'algorithme cherche ensuite à minimiser la métrique. On peut considérer simplement la latence ou alors à minimiser la charge de trafic pour freiner le taux de blocage, algorithme plus efficace stipulé dans (Mantelet, 2012).

Comme il s'agit ici d'un réseau transparent, que le choix des longueurs d'onde est crucial et que l'on fonctionne avec un PCE centralisé n'entraînant pas de mobilisation des ressources le temps de trouver le chemin, on recommande qu'à cette étape l'algorithme renvoie tous les

arbres possibles, et ce, afin de réduire la probabilité de blocage. Les étapes 7 et 8, comme nous le verrons, sont confiées à d'autres processus.

3.5.4 Protection

Lorsque c'est possible, le plan de contrôle est en mesure de définir un arbre de protection pour des connexions. L'algorithme de routage propose tous les arbres pour parvenir à la destination avant le choix de la longueur d'onde. Après ce processus, il peut choisir deux arbres n'appartenant pas au même groupe de liens partageant les mêmes risques (*Shared Risk Link Group*, SRLG) pour effectuer de la protection 1+1.

3.5.5 Assignment des longueurs d'onde

Jusqu'à présent, le PCE, lors de l'établissement d'une nouvelle connexion, sélectionne tous les arbres qui permettent de joindre les nœuds émetteurs aux nœuds récepteurs. Puis, pour chacun des arbres retenus, il détermine le port émetteur, ce qui lui permet de dresser la liste des ports émetteurs en amont et en aval susceptibles d'entraîner des collisions.

Pour tout résultat, en prenant le complémentaire de la concaténation des longueurs d'onde utilisées par chacun des ports émetteurs en amont et en aval, le PCE obtient une liste des longueurs d'onde disponibles pour effectuer l'établissement de la connexion. Il peut dès lors éliminer tout arbre pour lequel aucune longueur d'onde n'est disponible.

Notez que durant cette phase, le PCE pourrait inclure tous les filtres rencontrés dans le cas d'un réseau optique semi sans filtre. Chacun de ces filtres agit à l'inverse, provoquant :

- une libération et la possibilité de réutiliser certaines longueurs d'onde adéquates pour tous les nœuds situés en aval de ce filtre;
- ou une invalidation des longueurs d'onde dans la bande de blocage d'un filtre si advient qu'un chemin optique le traverse.

3.6 Validation physique

C'est alors au tour du second PCE d'entrer en jeu, et de valider, pour chaque candidat proposé (arbre et longueurs d'onde disponibles), quelle solution est la meilleure. Cette section intègre des travaux déjà effectués (Savoie, 2010), c'est-à-dire que l'outil de validation sans filtre (FLV) peut être directement inclus dans le PCE. Il s'agit en fin de compte de déterminer le taux d'erreur binaire (BER) à la réception d'une ligne de transmission optique sans filtre.

3.6.1 Stratégie du pire en premier

La stratégie du pire en premier consiste à sélectionner l'arbre et la longueur d'onde pour lesquels le taux d'erreur binaire à la réception est le pire, tout en demeurant acceptable. Ceci permet de garder les meilleures configurations pour des requêtes ultérieures qui seraient plus exigeantes.

3.6.2 Hypothèses sur une ligne de transmission optique sans filtre

3.6.2.1 Rappel d'une ligne de transmission optique sans filtre

La figure 3.8 est un rappel de la figure 2.4. Brièvement, une ligne de transmission optique sans filtre, se compose des éléments suivants :

- des transmetteurs munis de lasers accordables, et de modules électroniques de compensation de la dispersion, pouvant utiliser un format de modulation avancé (QAM ou DQPSK), et des débits de 10 Gbit/s, voire, de 40 Gbit/s, et 100 Gbit/s;
- de diviseurs et de combineurs de puissance optique passifs, et qui ne sont donc pas sélectifs en longueur d'onde;
- des amplificateurs consistant en de la fibre optique dopée à l'erbium (EDFA);
- des récepteurs cohérents sélectifs en longueur d'onde munis de dispositifs électroniques de compensation de la dispersion (DSP).

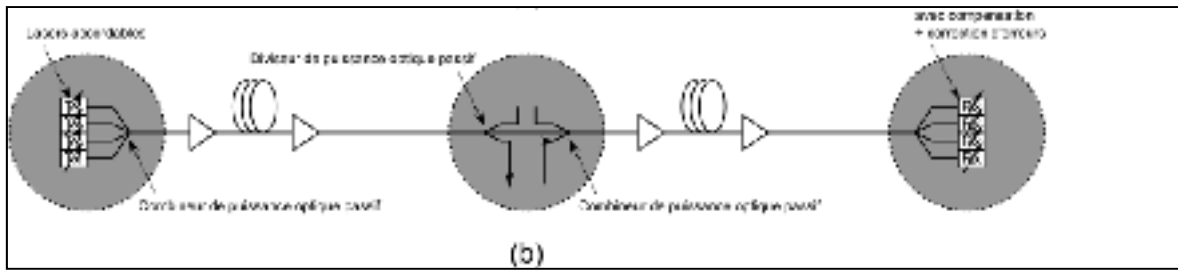


Figure 3.8 Rappel d'une ligne de transmission optique sans filtre

Pour rappel, les fibres à compensation de dispersion deviennent obsolètes et sont donc supprimées. En conséquence de quoi, il n'est plus nécessaire de compenser les pertes d'insertion associée, aussi les amplificateurs des réseaux optiques actifs à deux étages sont remplacés par des amplificateurs à un étage (hormis dans le cas où un égaliseur de puissance est nécessaire).

3.6.2.2 Contraintes physiques susceptibles de dégrader le signal

Les sources de distorsions susceptibles de dégrader le signal le long du chemin optique sont les suivantes, pour les réseaux optiques sans filtre (Savoie, 2010) :

- le bruit des amplificateurs nécessaires pour compenser les pertes d'insertion induites par les composants traversés, est donné notamment par la définition de sa densité spectrale (Agrawal, 2010), à l'aide de la constante de Planck (h), de la longueur d'onde du signal (ν), du coefficient d'inversion de population (n_{sp}) et du gain de l'amplificateur :

$$P_{ASE} = 2n_{sp} h\nu (G - 1) \quad (3.1)$$

- la dispersion représente un étalement temporel des impulsions lumineuses le long de leur propagation dans le chemin optique. On compte la dispersion chromatique (CD) qui est due à la différence de l'indice de réfraction de la fibre optique en fonction de la fréquence du signal, mais aussi de la dispersion modale de polarisation (PMD) qui correspond à une différence de vitesse de propagation des deux modes de polarisation du signal dans la fibre optique monomode, du entre autres à un défaut de cylindricité (fabrication et stress, températures et pressions exercées sur le médium) du cœur de cette dernière le long du chemin sur lequel se propagent les signaux;

- les effets non linéaires du medium sont observés lorsque les puissances de transmission maximales du régime linéaire sont dépassées. La diffusion Brillouin stimulée (SBS), la diffusion Raman stimulée (SRS), l'automodulation de phase (SPM), l'intermodulation de phase (XPM) et le mélange à quatre ondes (XPM), en sont des exemples;
- enfin, les sources de bruit des récepteurs comme le bruit quantique et le bruit thermique viennent s'ajouter à ce bilan.

3.6.2.3 Hypothèses du modèle utilisé

Comme vu dans la figure 3.8, une ligne de transmission optique sans filtre, dans le bilan des contraintes physiques, est très simple. Elle consiste en des fibres optiques, des diviseurs et combineurs de puissance optique passifs, et en des amplificateurs optiques. Les hypothèses du modèle présentées par Savoie (2010) sont les suivantes :

- les émetteurs emploient le format de modulation NRZ et un débit de 10 Gbit/s;
- toutefois la dispersion est compensée, non par de la fibre optique DCF, mais à la réception, par des dispositifs électroniques de compensation;
- les diviseurs et combineurs de puissance optique passifs entraînent une perte totale d'insertion de l'ordre de 3.2 dB par étage;
- le BER souhaité est de 10^{-12} et ce, en considérant qu'un code correcteur d'erreur puisse être utilisé.

3.6.3 Étapes de la validation physique

3.6.3.1 Détermination du taux d'erreur binaire à la réception d'une ligne de transmission optique sans filtre

Dans le cas d'une cascade d'amplificateurs, le taux d'erreurs binaires ne tient pas tant de la puissance du signal à la réception que de son rapport signal à bruit (OSNR). Ceci signifie que le facteur limitant est lié à la densité spectrale de bruit des amplificateurs, tel que dit dans Hui et O'Sullivan (2009).

Le livre mentionné présente un modèle de liaison simplifiée correspondant à une cascade d'amplificateurs et pour lequel les bruits à la réception (quantique, thermique) sont dominés par les bruits issus des amplificateurs et donc négligés. Le facteur de qualité d'un signal, directement relié à l'OSNR, peut être utilisé pour estimer le BER moyennant la fonction d'erreur complémentaire, comme montré respectivement par les équations (3.2) et (3.3) (Keiser, 2000) et (Tremblay, 2012), avec B_o et B_e les passantes respectives des filtres optiques et électriques aux récepteurs en GHz :

$$Q = \frac{\sqrt{\text{OSNR}_{\text{final}}}}{2} \sqrt{\frac{B_o}{B_e}} \quad (3.2)$$

$$\text{BER} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q} . \quad (3.3)$$

La formule de calcul proposé par Hui et O'Sullivan (2009) et exploitée par Savoie (2010), est rappelée à l'équation (3.4) :

$$Q = \frac{2 \Re(A - B)P_{\text{ave}}}{\sqrt{(4\Re(q + \rho_{\text{ASE}}\Re)AP_{\text{ave}} + \rho_{\text{ASE}}^2\Re^2(2B_o - B_e))B_e}} + \sqrt{(4\Re(q + \rho_{\text{ASE}}\Re)BP_{\text{ave}} + \rho_{\text{ASE}}^2\Re^2(2B_o - B_e))B_e}} , \quad (3.4)$$

où \Re est la réponse (*responsivity*) de la photodiode en V^{-1} (ou usuellement en A/W), q la charge d'un électron en C , P_{ave} la puissance moyenne reçue en W , considérée comme étant la puissance de transmission, compte tenu de l'hypothèse que les amplificateurs compensent exactement toutes les pertes induites par les composants de la ligne de transmission. A et B enfin sont des paramètres permettant de rendre compte de la fermeture de l'œil du signal dans le diagramme de l'œil, et dépendants de la dispersion.

La caractéristique de la ligne de transmission optique passive fondamentale (Savoie, 2010) est que, une ou plusieurs combinaisons, sont possibles dans un arbre avant la réception du

signal et que donc les densités spectrales de bruit doivent être sommées sur tous les liens optiques combinés avant le récepteur. Remarquons que la deuxième phase de l'algorithme 3.7 est précisément capable de les déterminer. La densité totale spectrale de bruit vaut donc :

$$\rho_{ASE} = \sum_{i=1}^{N_{OA}} \rho_{ASE-i} \quad (3.5)$$

Par ailleurs, la dispersion étant compensée à la réception, les paramètres A et B de l'équation (3.4) ont été définies par Savoie (2010) comme valant respectivement 1 et 0. Les équations (3.4) et (3.5), nous aident ainsi à déterminer le facteur Q, qui permet de déterminer l'OSNR et le BER à la réception à l'aide des équations (3.1) et (3.2), selon la formule simplifiée (3.6) directement transposable dans un algorithme de validation physique :

$$Q = \frac{2 \Re P_{ave}}{\sqrt{\left(4\Re(q + \sum \rho_{ASE-i} \Re) P_{ave} + (\sum \rho_{ASE-i})^2 \Re^2 (2B_o - B_e)\right) B_e} + \sqrt{((\sum \rho_{ASE-i})^2 \Re^2 (2B_o - B_e)) B_e}} \quad (3.6)$$

3.6.3.2 Calibration des puissances de transmission maximales pour demeurer en régime linéaire

La suppression des filtres et des commutateurs actifs nous laisse espérer une réduction des contraintes physiques liées à la diaphonie (*linear crosstalk*) (Agrawal, 2010). Malheureusement, les réseaux optiques sans filtre ne sont pas exempts des autres effets non linéaires comme, la diffusion Raman stimulée (SRS), l'intermodulation de phase (XPM) et le mélange à quatre ondes (FWM) (Savoie *et al.*, 2010). La diffusion Brillouin stimulée (SBS), étant une rétrodiffusion bloquée par les isolateurs à chaque site d'amplification optique, est en effet négligée ici.

On demeure au régime linéaire si la puissance de transmission par canal n'excède pas une valeur limite dépendant notamment de la longueur de la ligne de transmission, du nombre de canaux permis par lien optique ainsi que par l'espacement entre les longueurs d'onde. Ceci peut être calculé par un IA-PCE; il peut estimer, par arbre, en fonction de sa longueur maximale, du nombre de longueurs d'onde permises (typiquement 80) et de l'espacement entre les canaux, quelle est la puissance maximale tolérée pour demeurer en régime linéaire et ainsi limiter les dégradations issues de ces phénomènes.

La fraction totale de perte de puissance D liée à la rétrodiffusion Raman stimulée (SRS) est donnée par l'équation (3.8), et ne doit pas dépasser 5% afin de maintenir une pénalité en puissance inférieure à 0.5 dB (Agrawal, 2010). Soit, $\Delta\nu_{ch}$ l'espacement entre les canaux, g_R^{max} la valeur maximale du gain Raman valant typiquement $6.10^{-14} \text{ m.W}^{-1}$ et A_{eff} ($80 \mu\text{m}^2$) l'aire effective de la fibre optique.

Si la longueur effective du système vaut :

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \frac{L_A}{L} \quad (3.7)$$

où L est la longueur entre deux sites d'amplifications et vaut 80 km, L_A , la longueur totale de la ligne de transmission optique et α le coefficient linéaire d'atténuation de la fibre optique correspondant à une atténuation de 0.2 dB.km^{-1} , alors D vaut :

$$D = \frac{\Delta\nu_{ch} g_R^{max} P_{ch} L_{eff} N(N-1)}{6.10^{13} A_{eff}} < 0.05 \quad (3.8)$$

La puissance maximale dépend du nombre de canaux. Or, il est préférable que le système évite de changer la puissance de transmission à mesure que les connexions sont ajoutées ou relâchées sans quoi les transmissions seraient perturbées, le IA-PCE doit partir du pire des cas, c'est-à-dire considérer N comme le nombre de connexions maximales permises dans un lien et valant typiquement 80. L'équation (3.8) devient dès lors :

$$P < \frac{0.051 \cdot 10^{15}}{L_{\text{eff}} \cdot \Delta\nu_{\text{ch}}} \quad (3.9)$$

La figure 3.9 présente la puissance par canal à ne pas dépasser si l'on veut que les contraintes physiques liées à l'effet SRS soient négligeables. L'espacement inter canal peut être variable dans les réseaux optiques sans filtre étant donné qu'ils ne sont pas soumis à la contrainte liée aux filtres traversés par le signal. La seule limite existante pour cet espacement tient en fait de la capacité de discrimination des récepteurs.

Le PCE peut tenir compte du nombre total de connexions permises dans une fibre optique, de l'espacement entre les canaux et de la longueur de chaque arbre pour déterminer la puissance par canal maximale par arbre.

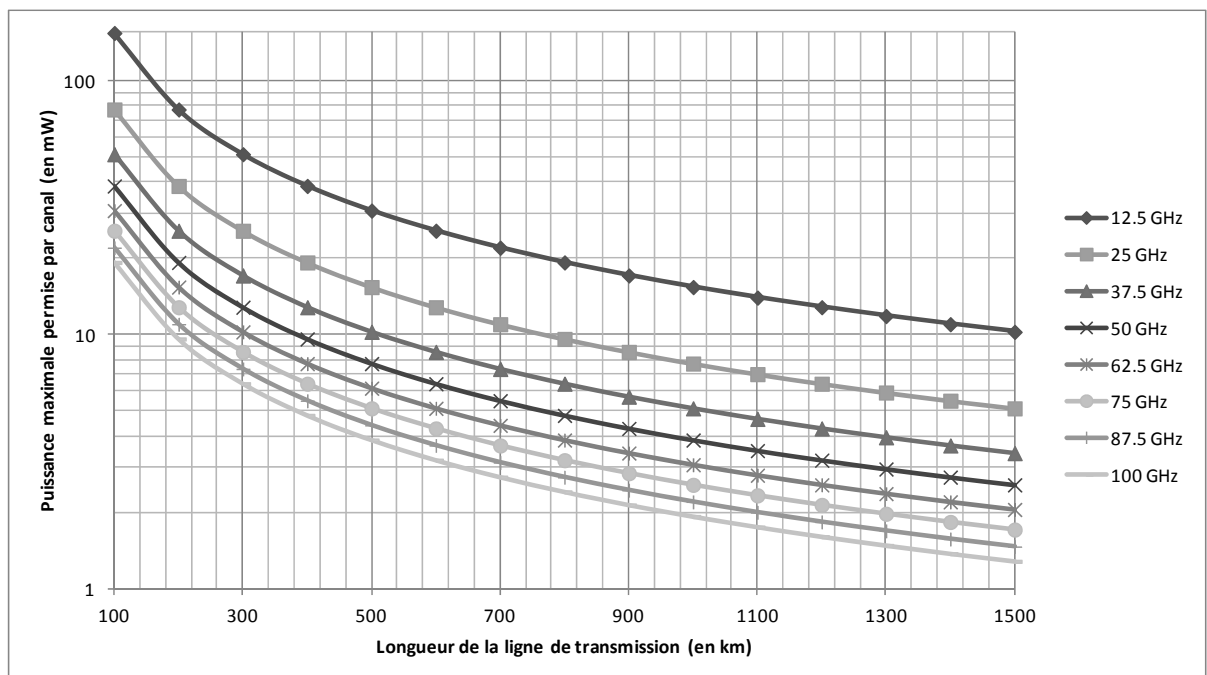


Figure 3.9 Puissance maximale par canal tolérée pour négliger la diffusion Raman stimulée (SRS) en fonction de la longueur de la ligne et de l'espacement inter canal

L'intermodulation de phase est donnée par la formule (3.10) (Agrawal, 2010) :

$$\phi_j^{NL} = \frac{\gamma}{\alpha} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j}^N P_m \right) \quad (3.10)$$

Dans le pire des cas de la détection cohérente et de l'utilisation des formats de modulation avancés, il est précisé que l'effet XPM est négligeable (Agrawal, 2010) si :

$$\frac{\gamma}{\alpha} (2N - 1) P_{ch} \ll 1 \quad (3.11)$$

avec,

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda \cdot A_{\text{eff}}} \approx 1.52 \cdot 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \quad (3.12)$$

où n_2 est la partie non linéaire de l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique et vaut $3 \cdot 10^{-8} \text{ } \mu\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ et A_{eff} l'aire effective de la fibre optique. Si l'on veut tenir l'inégalité de l'équation (3.11) inférieure à 0.05, on obtient :

$$\frac{\gamma}{\alpha} (2N - 1) P_{ch} < 0.05 \Leftrightarrow P_{ch} < 0.95 \text{ mW} \quad (3.13)$$

Enfin, le nombre de canaux fantômes générés par FWM (Kaur, 2008) est donné à l'équation (3.14) :

$$M = \frac{N^2(N - 1)}{2} \quad (3.14)$$

Et l'efficacité de conversion due à cet effet est explicitée par la formule (3.14), avec D la dispersion et $\Delta\lambda$ l'espacement entre canaux. On ramène cette efficacité à une valeur inférieure à 5% de façon à pouvoir négliger l'effet de la FWM, comme effectué avec l'effet SRS :

$$\eta = \sqrt{\frac{n_2}{A_{eff} D (\Delta\lambda)^2}} < 0.05 \quad (3.15)$$

L'effet FWM peut être évité avec une distribution inégale des longueurs d'onde dans le spectre. Or, l'avantage avec les réseaux optiques sans filtre est qu'il est facile de configurer les lasers accordables et les récepteurs cohérents de façon à procéder à cette technique, puisque tout filtre intermédiaire est supprimé.

3.6.4 Éléments du plan de contrôle et établissement d'une connexion

La figure 3.9 représente ultimement les différents éléments du plan de contrôle. Chaque nœud A à E dans le plan de données possède un OCC dans le plan de contrôle. Chaque OCC communique via l'OSC. Étant donné que l'OSC est implémenté de la même manière que dans les réseaux optiques actifs, la découverte du voisinage, ainsi que les algorithmes d'échanges de données procèdent selon des mécanismes similaires.

On note toutefois la présence des PCE qui, bien sûr, n'ont pas d'implémentation dans le plan de données. La condition est que tous les OCC doivent pouvoir rejoindre les PCE, mais pas nécessairement par une adjacence physique. Les PCE peuvent en outre être co-localisés à un nœud, ou non.

Ainsi la figure 3.10 montre que le RWA-PCE est directement connecté au nœud B via une interface quelconque (optique, Ethernet etc.), et ce nœud B doit permettre de router aux PCE les diverses requêtes qui parviennent sur les interfaces optiques de son OCC2.

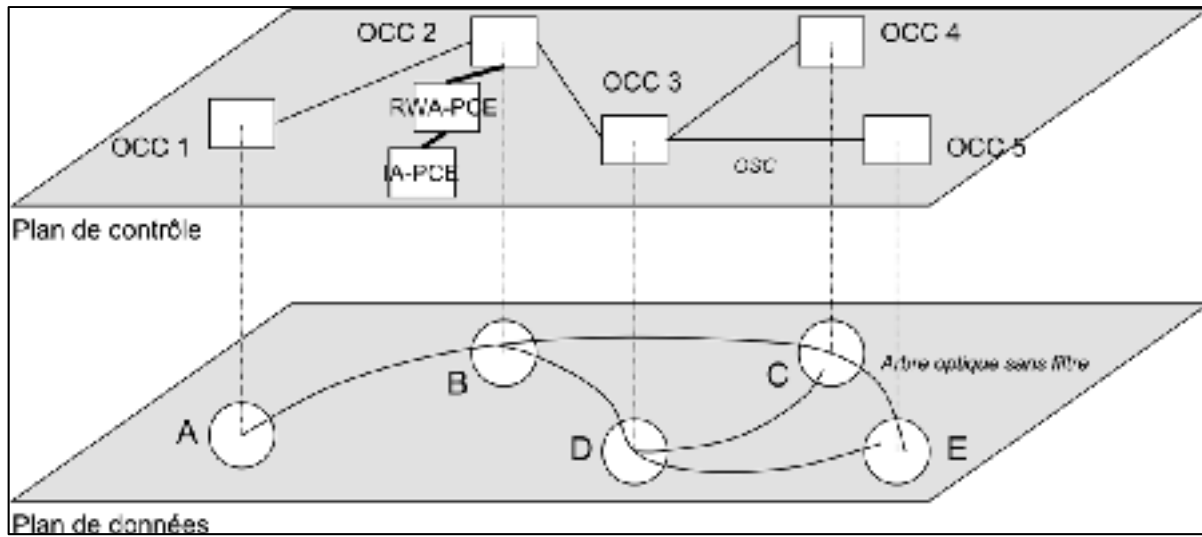


Figure 3.10 Illustration des éléments du plan de contrôle, adaptée de Mantelet (2012)

On imagine la situation où un nœud distant veut initier la création d'un chemin optique entre le nœud A et le nœud C. La figure 3.11 présente le diagramme séquentiel de l'opération sur le réseau optique sans filtre illustré par la figure 3.10. A chaque flèche correspond l'envoi d'un paquet. Le type du paquet est explicité, ainsi que le protocole qui est utilisé. En italique correspond une procédure interne, comme la mise en branle de l'algorithme 3.7 et de la détection des arbres optimaux qui en découlent (dont l'algorithme 3.8).

Il se peut qu'un nœud intermédiaire doivent router une requête, auquel cas le paquet est simplement symbolisé par « IP » en italique. Ceci correspond au protocole de la couche inférieure qui a été utilisé pour envoyer le paquet en question. Par exemple, le premier paquet que A envoie est de type PCEP, mais B le traite simplement comme un paquet IP et se contente de le router à l'aide de l'adresse IP du destinataire (RWA-PCE).

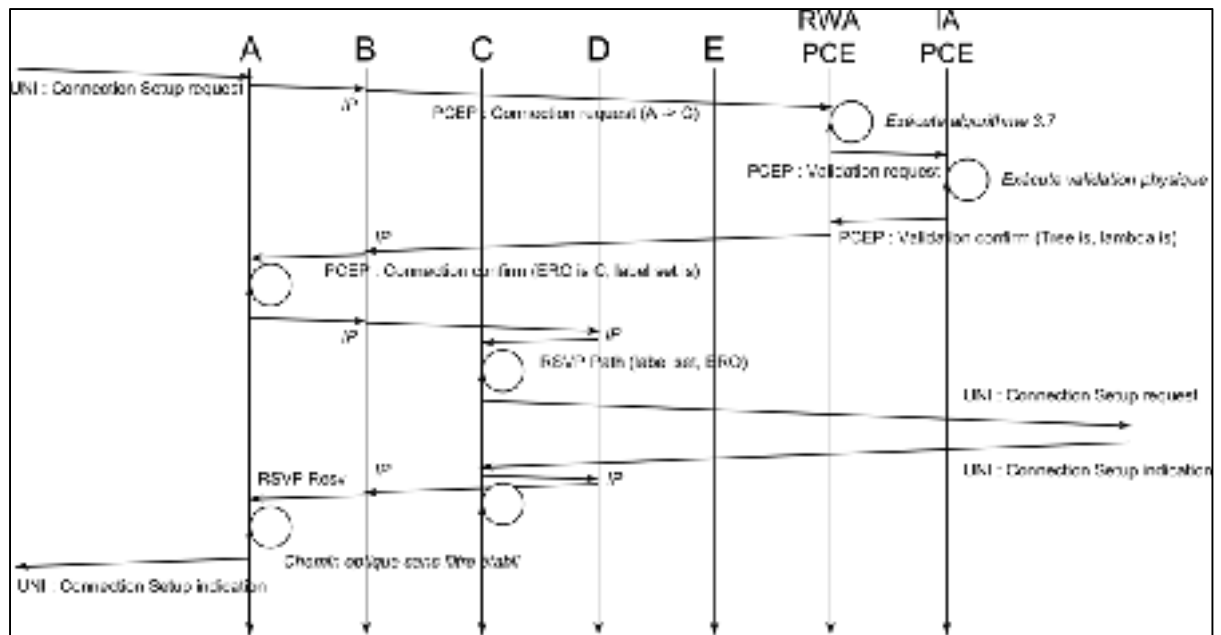


Figure 3.11 Diagramme séquentiel de l'établissement d'une connexion optique sans filtre

La situation fonctionne dans le cas où deux nœuds distants sont en train d'établir un chemin à travers une topologie optique sans filtre. La séquence présente une requête UNI relayée par le nœud A vers le PCE. Le PCE établit une liste d'arbres et pour chaque arbre une liste de longueurs d'onde disponibles à l'aide des algorithmes 3.7 et 3.8. L'ensemble des arbres est envoyé à un IA-PCE de façon à procéder au choix d'un arbre valide.

La réponse est envoyée au nœud A donnant de façon explicite la route à suivre, ainsi que la longueur d'onde à mobiliser. Le nœud A effectue sa requête RSVP Path directement en fonction de la route explicite qui lui a été fournie. Le nœud C procède à la fin de la connexion, par UNI dans un premier temps, et une fois la confirmation obtenue, retourne un message RSVP Resv pour confirmer l'établissement de la connexion au nœud A.

On note qu'aucun nœud intermédiaire (B, D, E) n'a à participer à l'échange de messages dans la mesure où le PCE dispose de l'intégrité de l'information et effectue le calcul de la route optimale. Comme les équipements traversés sont passifs, toute configuration des nœuds intermédiaires serait redondante.

3.7 Présentation du simulateur de plan de contrôle optique passif

Le simulateur de plan de contrôle optique passif reprend les détails et stratégies précédemment décrites.

- le routage est effectué par arbre, en minimisant la charge sur chaque arbre de façon à améliorer les performances. Notez que le résultat du routage dépend donc des connexions préalablement existantes;
- l'assignation des longueurs d'onde est effectuée sur une grille ITU, en attendant les travaux ultérieurs rapportés sur les concepts de filtrage passif et d'indépendance à la grille. La stratégie retenue est une stratégie de type *first-fit* (Mukherjee, 2006);
- le validateur de couche physique incorpore les travaux déjà effectués et accepte ou rejette une solution proposée. Une stratégie de *worst-first* permet d'améliorer les performances même si dans les sections ultérieures du document aucune classe de trafic ne sera spécifiée;
- la contraction, l'expansion des *trailed light trees* ou l'établissement de chemins de diffusion sont effectués selon un principe du « le plus est le mieux ». C'est-à-dire que le simulateur va tenter de connecter le plus de nœuds possibles. S'il ne parvient pas à tous les connecter, il ne conclut pas à un échec, mais demande à l'utilisateur de demander une autre connexion séparée pour les nœuds non connectés;
- le simulateur assume enfin que la découverte du voisinage et l'amorçage du plan de contrôle sont effectués, ce qui signifie que l'on ne peut ajouter de nœud, ou changer la topologie en cours de simulation.

3.7.1 Vue du réseau

La figure 3.12 présente le simulateur de plan de contrôle réalisé avec le langage de programmation java, et donc les méthodes les plus fondamentales sont présentées dans l'annexe II. Les deux listes en haut à droite représentent le prototype de création de connexion de type *point and click*, tel que cité dans le chapitre un. Il suffit de sélectionner un ou plusieurs nœuds émetteurs et un ou plusieurs nœud destinataires puis de cliquer sur le

bouton *establish lightpath* pour demander au simulateur de chercher le meilleur arbre, et la meilleure longueur d'onde dans la topologie dont il a une vue d'ensemble complète, puis de valider physiquement son résultat.

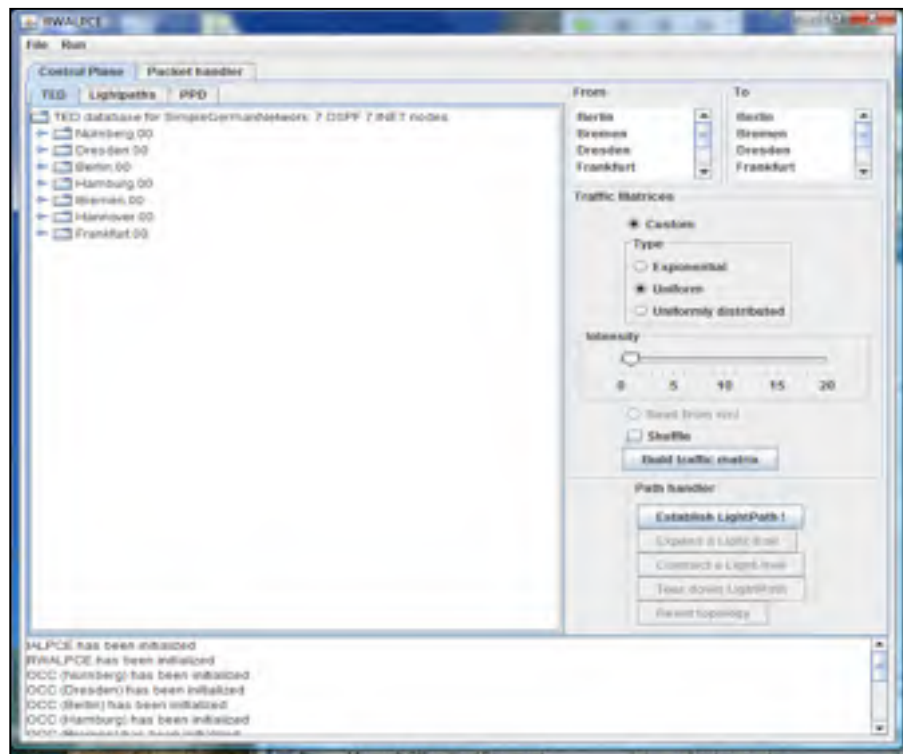


Figure 3.12 Présentation du simulateur

L'écran principal représentant un arbre est la retranscription de sa vue du réseau. Chaque nœud y apparaît, et en déroulant l'arbre, il est possible de déterminer l'état des ressources de chaque nœud.

Le plan de contrôle est aussi en mesure de générer des matrices de trafic comme on en discutera par la suite.

3.7.2 Gestion des connexions

3.7.2.1 Établissement des connexions et prise en compte du partage des ports

La demande d'établissement de connexion est présentée à la figure 3.13. Ici, il a été demandé une simple liaison unicast entre les villes de Nürnberg et de Berlin.

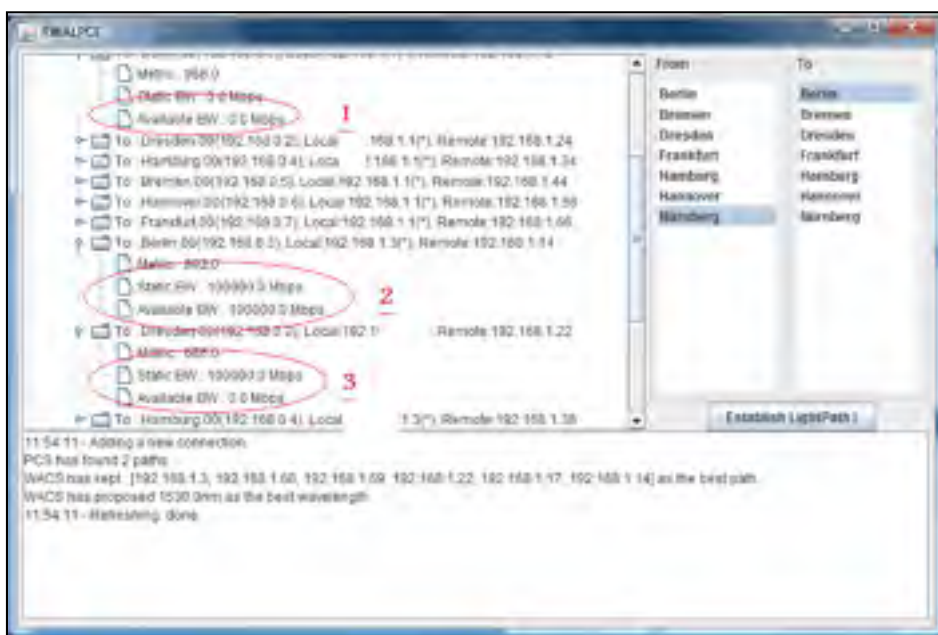


Figure 3.13 Calcul d'une connexion entre Nuremberg et Berlin par le simulateur de plan de contrôle optique sans filtre

La particularité des réseaux optiques sans filtre est bien présente ici. La liste des ports du nœud Nürnberg est présente dans la figure 3.13. Le PCE énumère tous les nœuds qui peuvent être joints (i.e. To : Dresden), et fournit l'adresse de son port qui lui permet de le joindre. En l'occurrence, le port 192.168.1.1 peut joindre directement Dresden, Hamburg, Bremen, Hannover et Frankfurt.

En 1 a été étendu un port n'ayant aucun rapport avec la connexion qui nous intéresse. C'est pour cela que les champs liés à sa bande passante disponible (BW) sont mis à 0. Pour le port en connexion directe avec Berlin, on voit que le laser a été allumé en 2. Sa bande passante est

disponible pour le trafic. En 3 enfin, a été étendu le champ permettant de joindre une autre ville (Dresden), mais par le même port que Berlin. Le PCE a bien vu un laser allumé (*static BW*), mais sa bande passante disponible pour Dresden est déjà réservée. C'est pour cela que le champ *available BW* est mis à 0.

3.7.2.2 Validation de la couche physique

La figure 3.14 nous montre un exemple de validation de la couche physique reprenant les travaux antérieurs (Savoie, 2010). Dans ce cas précis, le simulateur donne ses calculs intermédiaires à une console. En l'occurrence, deux arbres ont été trouvés, et le processus d'assignation de longueur d'onde a choisi pour cette connexion la longueur d'onde 1530 nm, la première qui convenait et a estimé d'après (Savoie, 2010) que l'OSNR est de 22.2 dB pour cette connexion.

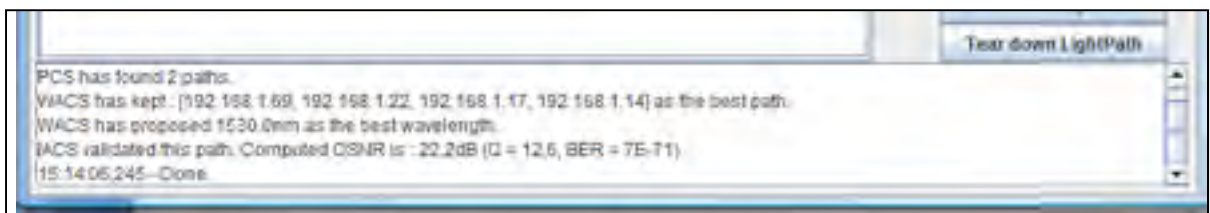


Figure 3.14 Intégration du valideur de réseau optique sans filtre

La base de données du deuxième PCE maintient aussi tous les paramètres physiques importants pour la bonne gestion de la couche physique. Elle énumère tous les transpondeurs actifs et détermine aussi la puissance maximale à laquelle ils transmettent, ainsi que le taux nécessaire de pré ou post compensation pour remettre en forme proprement le signal.

La figure 3.15 montre le produit final dans le second PCE d'une connexion entre Frankfurt et Berlin. En rouge, on retrouve les paramètres préalablement évoqués.

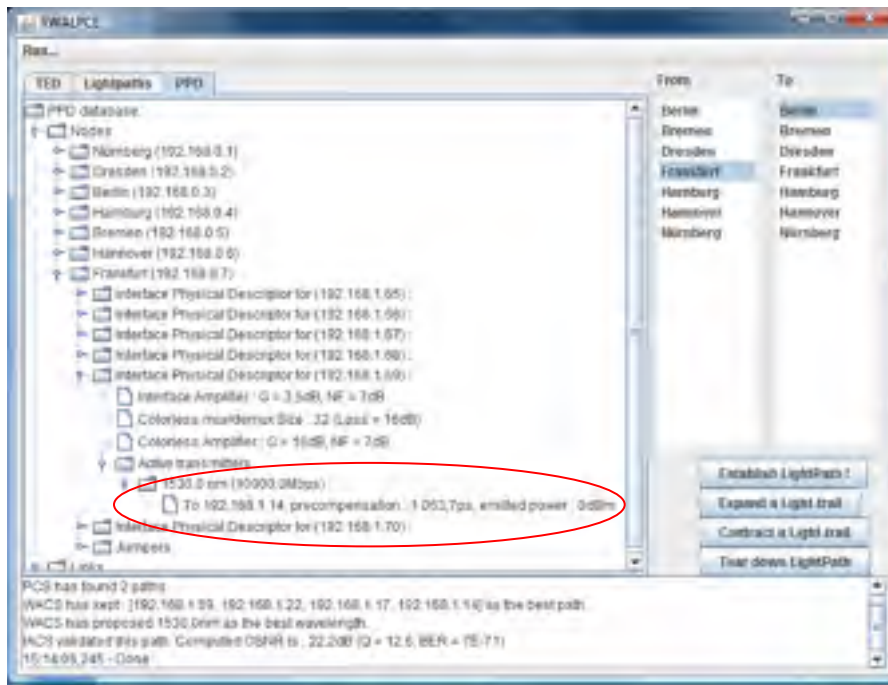


Figure 3.15 Maintien des paramètres physiques après la validation pendant l'établissement de la connexion

3.7.2.3 Maintien des connexions préalablement établies pour gestion des collisions

De la figure 3.16, le PCE est en mesure de maintenir une table des connexions préalablement existantes sur le réseau. Il sait à quelle longueur d'onde les connexions sont établies et entre quels nœuds émetteurs et destinataires elles sont censées se propager.

Notez qu'il n'y a pas de chemin spécifié et que l'on ne sait pas où se propagent les éventuels canaux non filtrés. En revanche, par les algorithmes précédemment vus (dont l'algorithme 3.7), le PCE est en mesure de les retrouver.

| RWALPCE | | | | |
|-----------------------------------|--------|---------|-------------|-----------|
| Run... | | | | |
| <div>TED Lightpaths PPD</div> | | | | |
| Id | Lambda | BW | From | To |
| 0 | 1530.0 | 10000.0 | [Frankfurt] | [Dresden] |

From
 Berlin
 Bremen
 Dresden
 Frankfurt

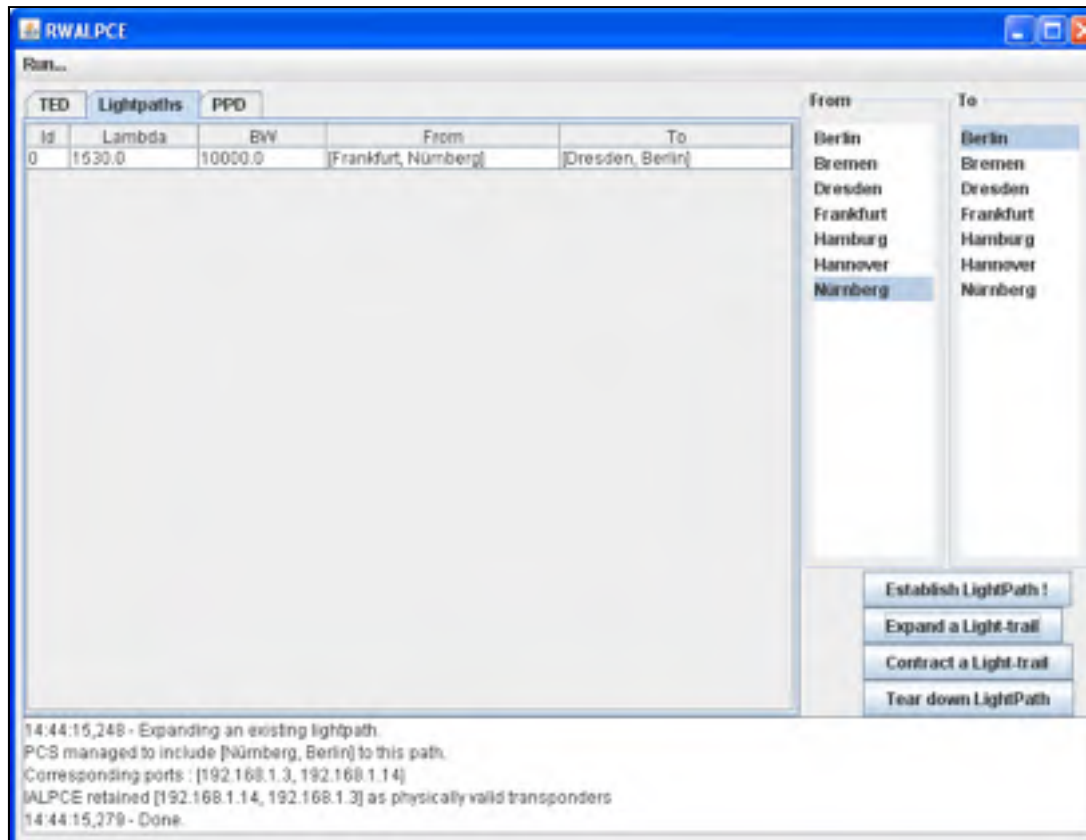
Figure 3.16 Les connexions existantes sont répertoriées et maintenues par le simulateur pour gérer les risques de collisions ultérieures issues des nœuds émetteurs amont et aval

Cette table est importante, car, à partir des ports émetteurs en amont et en aval, il est possible d'éviter les collisions précisément grâce au champ mentionné *Lambda*.

3.7.3 Gestion des trailed light-trees

Il est possible d'inclure plusieurs nœuds dans une même piste optique multipoint à multipoint comme précisé dans les chapitres précédents. Dans ce cas, plusieurs nœuds apparaissent dans la liste des chemins optiques existants.

En l'occurrence, dans la figure 3.17, nous remarquons que deux nœuds intermédiaires accèdent à cette ressource (longueur d'onde 1530 nm) pour émettre simultanément vers Dresde et Berlin. Le concept est similaire à celui de (Gumaste *et al.*, 2008).

Figure 3.17 Création d'un *trailed light-tree*

3.7.4 Processus de capture de trace protocolaire

Afin de permettre de valider les solutions proposées par les PCE, le simulateur émule des échanges de paquets. La figure 3.18 présente les échanges particuliers à la première section de ce chapitre. Un nœud distant au réseau optique sans filtre a demandé, par l'intermédiaire d'UNI, l'établissement d'une connexion (paquet dont l'identifiant est 0 et 1). Les paquets 2 à 5 correspondent à l'échange entre le nœud en bordure et le PCE en vue du routage par arbre, de l'assignation de longueur d'onde, et enfin de la validation de la solution retenue. Les deux paquets qui s'ensuivent correspondent au processus même de la signalisation, un paquet de réservation, et la confirmation en retour. La suite, entre autre, permet de confirmer au nœud initial de la réservation des ressources dans le réseau optique sans filtre.

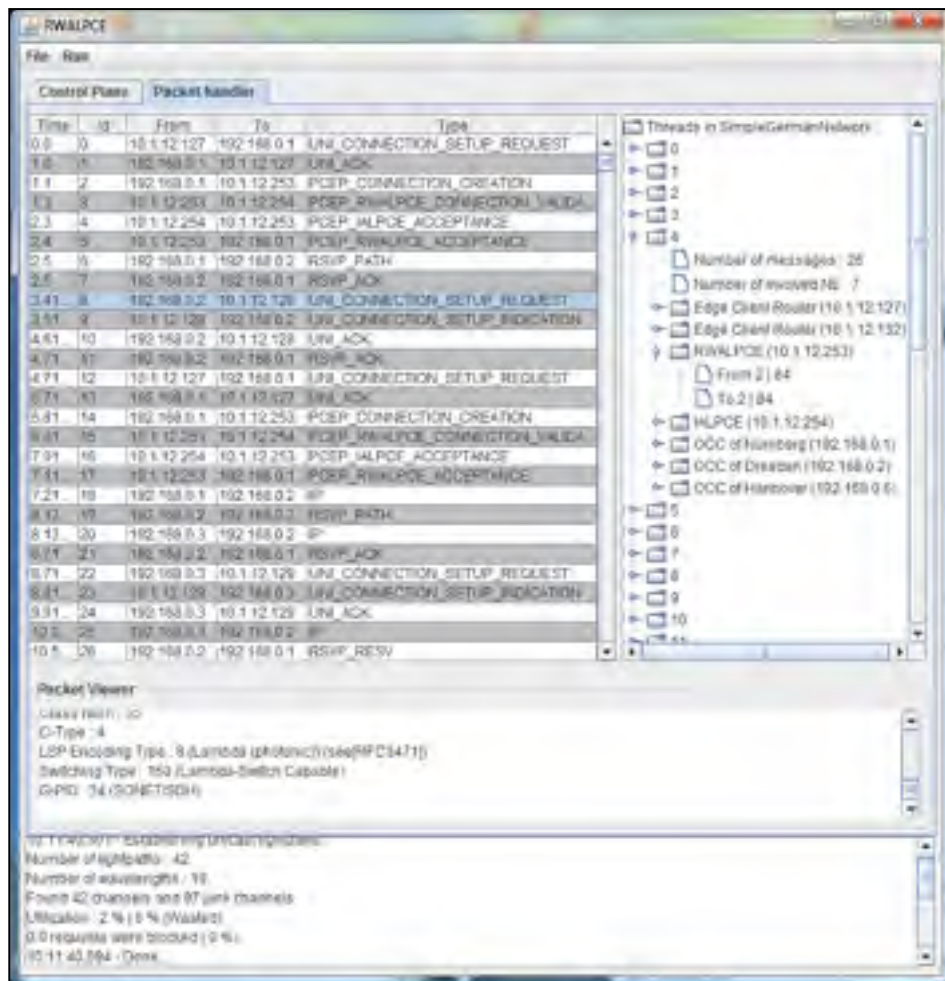


Figure 3.18 Trace protocolaire simulant l'échange des requêtes dans le réseau

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés spécifiques aux réseaux optiques sans filtre, et en avons présenté les points qui doivent être pris en compte par un plan de contrôle dont nous avons préalablement défini les tenants. Notamment :

- la formation des boucles lasers peut être évitée par un procédé adéquat lors du lancement du réseau, d'une modification manuelle de sa topologie ou encore de l'ajout d'un nouveau nœud. Ceci signifie toutefois d'envisager d'implémenter le brevet de Jean Luc Archambault (2011), c'est-à-dire de permettre à un nœud de découvrir sa topologie

interne et d'aller contacter un composant compétent (NMS, PCE) de façon à valider que sa topologie interne ne va pas tout simplement provoquer l'effondrement du réseau;

- la gestion des canaux non filtrés peut être effectuée lors du routage, de l'assignation de longueur d'onde, et de la réservation d'une connexion. En effet, un PCE, avec sa vue totale du réseau, est en mesure de dépasser les risques qu'une architecture de contrôle distribuée ne serait pas capable de prévoir l'apparition d'un canal transitant sur un chemin issu d'une connexion complètement disjointe à ce chemin;
- un simulateur de plan de contrôle a en outre été proposé, et pour cela il synthétise les différents concepts discutés dans ce chapitre.

Le chapitre quatre est dédié à la validation des concepts vus ici et dans le chapitre deux. Une tentative de démontrer la possibilité de créer un réseau optique sans filtre à partir d'un réseau optique actif existant y est présentée. Le chapitre cinq conclut par une étude dont le but est de prouver la compétitivité en termes de coût et de consommation électrique vis-à-vis des solutions optiques à commutation active, mais aussi en comparaison avec la couche réseau.

En ce qui concerne le simulateur présenté dans ce chapitre, il est mis directement à contribution de façon à faire l'étude des canaux non filtrés qui transitent sur un réseau optique sans filtre et augmentent sa probabilité de blocage.

CHAPITRE 4

VALIDATION DES CONCEPTS DU CONTRÔLE OPTIQUE SANS FILTRE

4.1 Définition d'une plate-forme optique sans filtre

Nous avons vu dans le chapitre deux qu'il est possible d'envisager qu'un réseau optique sans filtre n'entraîne pas de bouleversement majeur de paradigme des plates-formes métropolitaines; un atout particulièrement intéressant, car ceci signifie que l'on peut continuer d'opérer de tels réseaux de façon analogue aux réseaux optiques à commutation active.

Dans cette section, nous montrons qu'il est possible d'utiliser des plates-formes actives existantes basée sur des OADM et même sur des architectures opaques, et de les transformer en des réseaux optiques sans filtre, par le montage présenté aux figures 4.1 et 4.2.

L'expérience de validation effectuée au laboratoire de technologies de réseaux Ciena de l'ÉTS sur les plates-formes *Ciena Optical Metro 3400/3500 et 5200TM* a fait l'objet d'un rapport interne. Les équipements qui y sont présents sont en effet idéaux pour réaliser ce genre d'expérience, c'est-à-dire un sous réseau allemand à sept nœuds, tel celui illustré à la figure 2.2.

La figure 4.1 présente le montage tel qu'il a été effectué. L'étagère de droite comporte trois baies *Ciena Optical Metro 5200TM*, et celle du centre comprend trois baies *Ciena Optical Metro 3500TM*. A chaque fois qu'il a été possible de les supprimer, les filtres sélectifs en longueur d'onde ont été remplacés par des diviseurs de puissance optique passifs.

Les cercles rouges montrent que des coupleurs de puissance optique passifs à deux ports d'entrée et deux ports de sortie utilisés comme des diviseurs ont été ajoutés. Ils agissent directement dans les interconnexions comme on en a discuté à travers les chapitres deux et trois.

Le montage a aussi requis ici cinq cartes SONET OC-12 (munies de transmetteurs et récepteurs œuvrant à 1310 nm et à 622 Mbit/s), ainsi que trois cartes tributaires opérant à 1.25 Gbit/s.



Figure 4.1 Réalisation d'un réseau sans filtre au laboratoire de technologies de réseau Ciena.

L'*OmniBER718* d'*Agilent* à droite sur la figure nous a servi à injecter un signal sous la forme de trames SONET OC-12 et de vérifier que le signal nous revenait avec un minimum d'erreurs.

La figure 4.2 représente le schéma de la topologie qui a servi à l'expérimentation. Les carrés blancs représentent les diviseurs de puissance optiques passifs. Ce montage inclut un arbre passif optique et consiste dans l'injection d'un signal de test à la baie de l'étagère de gauche représentant la ville de Nürnberg. Le générateur de signal n'injecte pas directement le signal

dans l'arbre de façon à bien déclarer la baie figurant Nürnberg comme un nœud de bordure entre d'une part le réseau du client, et d'autre part le réseau propre de l'opérateur.

Cette baie effectue le relais électrique du signal, puis l'injecte optiquement dans la topologie, où un premier diviseur effectue l'extraction locale du signal pour le compte de la baie du haut de l'étagère centrale figurant Leipzig, puis un deuxième diviseur distribue le signal entre la baie du haut de l'étagère de droite (qui termine cette branche de l'arbre, à Frankfurt) et Berlin.

De là, un autre diviseur effectue l'extraction locale pour la baie du centre de l'étagère centrale (Berlin) avant que ce signal ne soit lui aussi distribué en direction de la baie du centre de l'étagère de droite (Hamburg) et de la baie du bas (Hannover). A cette dernière se trouve un dernier diviseur qui effectue l'extraction locale ainsi que le relais du signal en vue de la baie du bas de l'étagère de droite à Bremen.

De là à Hannover, un mécanisme de retour est mis en place (en pointillé) de façon à ce que les données reviennent vers le générateur de données aléatoires de façon à procéder à l'étude du taux d'erreurs binaires.

Nous nous sommes assurés que chaque baie atteinte recevait non seulement un signal, mais aussi que celui-ci possédait un taux d'erreur minimum. Après une heure de simulation, nous n'avons pas constaté d'erreur, ce qui signifie que le taux d'erreur est majoré par la borne supérieure estimée comme suit :

$$BER < \frac{1}{6.22 \cdot 10^8 \cdot 3600} = 4.47 \cdot 10^{-13} \quad (4.1)$$

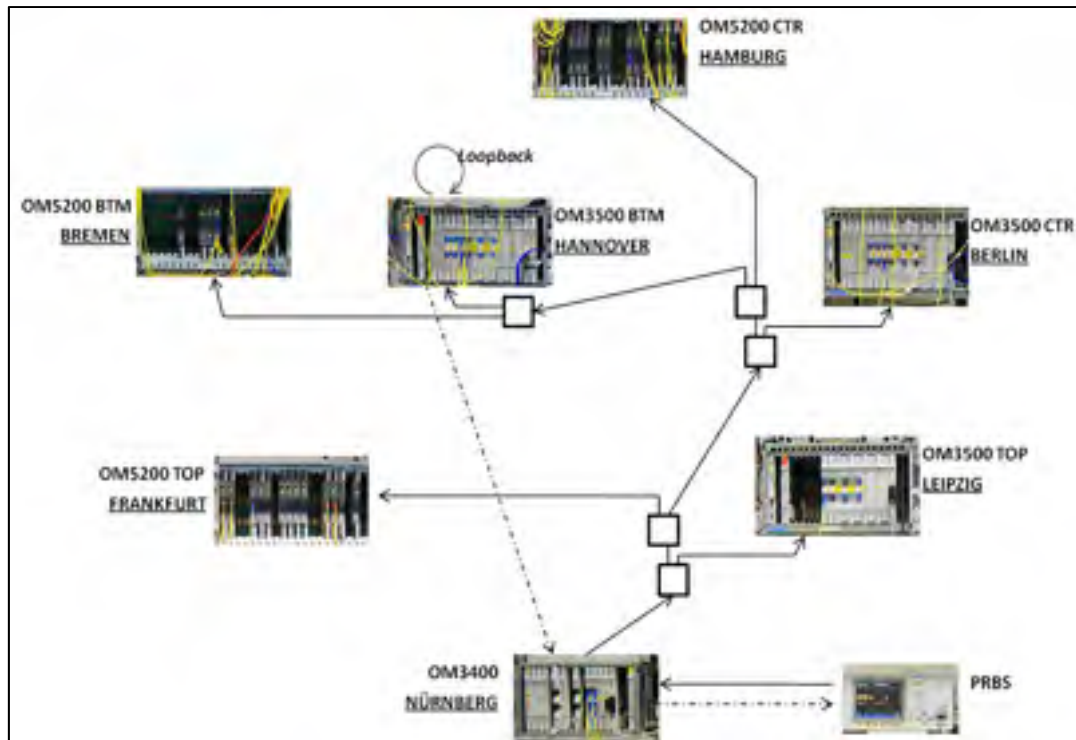


Figure 4.2 Schéma du mini-réseau sans filtre à sept nœuds

Les distances entre les baies dans l'expérience sont de l'ordre du mètre, et ne représentent pas celles qui séparent réellement les villes simulées et qui sont de l'ordre de la centaine de kilomètres. De ce fait, il n'y a pas de phénomène physique susceptible d'avoir un impact sur le BER, tel que les dispersions, les atténuations, et donc le bruit issu des amplificateurs qui auraient été nécessaires.

Ce montage valide toutefois le fait qu'il est possible de construire un arbre optique sans filtre sur des infrastructures actives pour effectuer une diffusion sans dégrader le signal. Notez toutefois que la combinaison a entraîné des phénomènes similaires à ceux décrits dans le chapitre deux, à savoir que les trames SONET interféraient entre elles puisque les baies de l'étagère du centre opèrent toutes à la même longueur d'onde. Nous avons en effet constaté que du signal était reçu mais que celui-ci ne pouvait pas être exploité. Il manquait un plan de contrôle pour faire l'évitement des collisions.

4.2 Sélection d'une solution optique sans filtre optique

Le simulateur de plan de contrôle optique sans filtre est en mesure de générer des matrices de trafics et des solutions (non optimales) de routage et d'assignation de longueurs d'onde pour une séquence de demandes d'établissement dynamique des connexions.

Nous présentons dans un premier temps quelques tests en vue de valider le comportement du simulateur, et notamment de s'assurer qu'il ne produit pas de collision de longueurs d'onde. Ensuite, trois niveaux de performances pour des réseaux de référence sont présentés : le nombre de longueurs d'onde nécessaire pour répondre à une matrice de trafic, le nombre de canaux non filtrés, et le nombre de requêtes bloquées. Des résultats sont esquissés par la suite, puis analysés. Ils présentent le détail des opérations qui ont amené à la production des résultats montrés dans Mantelet (2012).

En conséquence, ce simulateur permet de déterminer quelle solution topologique issue du design des travaux antérieurs lui paraît la plus efficace selon ces niveaux de performance. Ceci nous apparaît important, car l'outil de design issu de (Archambault, 2009) pourrait générer successivement plusieurs solutions qu'il serait possible de valider très rapidement par un crible que nous présentons, retenir les meilleurs candidats et appliquer ensuite un algorithme de routage statique optimal.

4.2.1 Différence avec les algorithmes RWA statiques

Les travaux antérieurs ont porté sur la définition d'outils permettant (Archambault, 2008), pour une matrice de trafic donnée, de chercher les routes optimales et de faire l'assignation de longueurs d'onde, de façon à réduire le nombre total des longueurs d'onde utilisées. Ces outils effectuent du routage de manière statique (Koo, 2004), (Mukherjee, 2006), c'est-à-dire en fait qu'ils partent d'une connaissance à priori du réseau, et de sa matrice de trafic pour trouver la configuration optimale.

Ceci pose plusieurs contraintes pour les insérer dans un plan de contrôle, sous les conditions d'un établissement dynamique de connexions. Tout d'abord, ce sont en général des algorithmes complexes qui ont besoin de temps pour parvenir à une solution. Il est vrai toutefois que les connexions optiques sont établies pour des durées de l'ordre du mois, et le temps d'établissement des connexions devient dès lors relativement court comparé à ce temps de service. Pourtant, deux points sont donc à considérer :

- d'une part, le temps d'établissement des connexions tend à être de plus en plus court, de quelques jours au début des années 2000, à quelques minutes actuellement (Nederlof et al., 2001);
- les réseaux tendent à exiger de la couche optique à être de plus en plus orienté sur IP, et ses caractéristiques de fluctuations imprédictibles tendent à nous laisser considérer la nécessité pour un plan de contrôle d'établir le plus rapidement possible des connexions (Devarajan et al., 2010).

Ensuite, nous avons vu que ces algorithmes (Oki et al., 2005) partent d'une connaissance à priori de la matrice de trafic, ce qui peut être pratique lors du lancement d'un réseau, mais le plan de contrôle doit tenir compte de requêtes établies successivement, et dans un ordre ultérieur théoriquement impossible à prédire dans le présent.

Enfin, d'après le précédent point évoqué, la demande d'établissement d'une nouvelle connexion risque de pousser l'algorithme à reconsidérer l'ensemble des connexions actuelles en vue de chercher une solution optimale. Il peut donc être amené à produire un résultat pour lequel plusieurs connexions doivent être perturbées.

Nous proposons ici le système de deux PCE coopérants, comme décrit dans le chapitre trois, de façon à pouvoir générer très rapidement des matrices de trafic, puis des séquences d'établissement de connexions diverses et à en effectuer le routage, dans un contexte dynamique d'établissement de connexions. De là, le système procède au routage et à l'assignation de longueurs d'onde sans perturbation, donc non optimal, mais très rapide.

4.2.2 Validation du simulateur de plan de contrôle optique sans filtre

4.2.2.1 Rappel des stratégies du simulateur de plan de contrôle optique sans filtre

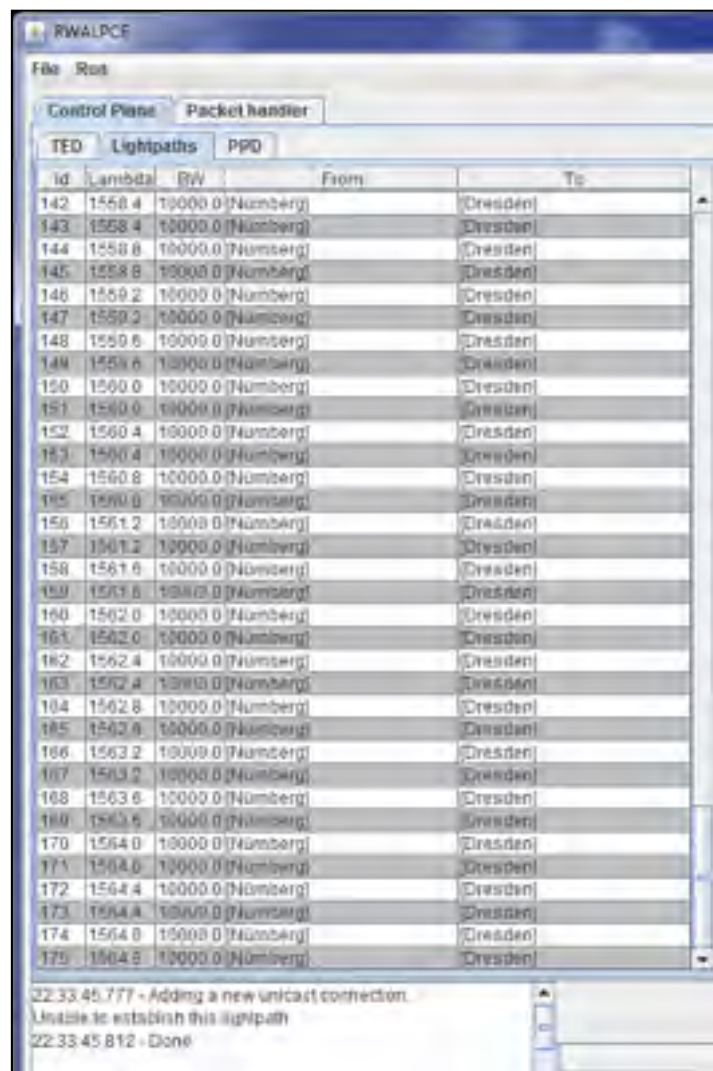
Le simulateur de plan de contrôle optique sans filtre fonctionne de la manière suivante :

1. pour une demande de connexion donnée entre deux points, il va produire la liste de tous les arbres passifs qui permettent en un seul saut de joindre les deux nœuds (c'est-à-dire sans régénération optoélectronique);
2. il sélectionne l'arbre qui est le moins occupé, dont le compte du nombre de longueurs d'onde est le plus faible, selon une stratégie d'équilibrage de charge (*load balancing*); le compte inclut les canaux non filtrés;
3. il choisit ensuite la première longueur d'onde disponible;
4. et s'assure enfin que la liaison entraîne un BER acceptable, sinon il sélectionne un nouvel arbre comme spécifié au point 2;
5. en conséquence, il établit la connexion et mobilise les ressources;
6. si aucun arbre n'est disponible parce que les ressources sont insuffisantes ou que les contraintes physiques diminuent la qualité du signal en dessous du minimum requis, la connexion est rejetée et le simulateur incrémente un compteur permettant de calculer le taux de blocage.

4.2.2.2 Gestion des collisions et de l'équilibrage de charge

A partir d'une topologie issue de l'outil de design sans filtre (Archambault, 2009), il est possible de demander au simulateur d'établir manuellement des connexions entre deux points. Nous pouvons d'une part exécuter la même demande entre deux mêmes nœuds joignables par deux arbres, plusieurs fois de suite et vérifier que, d'une part, les connexions sont établies sur les deux arbres alternativement, mais aussi que chaque connexion emploie bien une longueur d'onde unique – c'est-à-dire qu'il n'y a pas de collision de longueur d'onde.

La figure 4.3 nous aide à valider ce point. A partir de la figure 2.2, nous voyons que de Nürnberg à Dresden, il existe deux arbres potentiels. En ne cessant de demander des connexions entre ces deux nœuds, le simulateur choisit bien alternativement un des deux arbres, et effectue sa gestion des collisions. C'est pourquoi l'on voit se succéder des séries de deux identifiants avec la même longueur d'onde. Chacune porte dans les faits sur un arbre différent.



| ID | Lambda | RW | From | To |
|-----|--------|---------|----------|---------|
| 142 | 1558.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 143 | 1558.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 144 | 1558.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 145 | 1558.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 146 | 1559.2 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 147 | 1559.2 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 148 | 1559.6 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 149 | 1559.6 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 150 | 1560.0 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 151 | 1560.0 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 152 | 1560.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 153 | 1560.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 154 | 1560.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 155 | 1560.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 156 | 1561.2 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 157 | 1561.2 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 158 | 1561.6 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 159 | 1561.6 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 160 | 1562.0 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 161 | 1562.0 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 162 | 1562.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 163 | 1562.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 164 | 1562.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 165 | 1562.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 166 | 1563.2 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 167 | 1563.2 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 168 | 1563.6 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 169 | 1563.6 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 170 | 1564.0 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 171 | 1564.0 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 172 | 1564.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 173 | 1564.4 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 174 | 1564.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |
| 175 | 1564.8 | 10000.0 | Nürnberg | Dresden |

22:33:45.777 - Adding a new unicast connection.
 Unable to establish this lightpath
 22:33:45.812 - Done

Figure 4.3 Répartition des chemins optiques par une technique d'équilibrage de charge

Comme hypothèse, 88 canaux maximum sont permis par fibre optique, aussi est-il normal qu'à la connexion n°176 (la première connexion porte l'index 0) il n'y ait tout simplement plus de solution; c'est pourquoi nous pouvons constater un blocage.

Nous pouvons aussi effectuer deux demandes successives d'établissement de connexion portant sur des nœuds d'un même arbre et s'assurer que toutes les règles décrites dans le chapitre trois sont bien respectées, c'est-à-dire :

- que deux connexions non disjointes doivent utiliser chacune une longueur d'onde différente selon les critères définis au chapitre trois;
- qu'une connexion empruntant le passage d'un canal non filtré ne doit pas occuper la même longueur d'onde que celle de la connexion qui a généré ce canal non filtré;
- que deux canaux non filtrés non disjointes doivent utiliser chacun une longueur d'onde différente.

Ainsi, depuis la figure 2.2, nous effectuons les demandes d'établissement des connexions suivantes : Hamburg vers Bremen, puis Bremen vers Hannover, ensuite Berlin vers Hannover et enfin Bremen vers Berlin.

Ces connexions portées sur l'arbre bleu devront toutes occuper une longueur d'onde différente. Au besoin, le simulateur de plan de contrôle optique sans filtre créé autant de connexions superflues que nécessaire de façon à forcer le PCE à choisir l'arbre bleu par sa stratégie de balancement de charge (*load balancing*). La topologie correspondante (les adresses des ports) ainsi que la capture du document faisant état des connexions établies et mention des ressources mobilisées, en annexe III, attestent de la réussite du test.

4.2.3 Définition de la validation

L'ordre dans lequel s'effectue l'établissement des connexions est crucial, car deux ordres différents peuvent produire deux résultats différents. En effet, le choix, à un instant donné,

par le PCE de l'arbre le plus approprié dépend de l'état du réseau, or celui-ci dépend justement de la séquence des connexions établies.

Nous estimons qu'au contraire d'un algorithme statique qui produira toujours le même résultat quelque soit la séquence d'établissement des connexions, les résultats ici peuvent changer à chaque fois que l'on modifie cette séquence. De ce fait, pour chaque matrice générée, nous allons concevoir une kyrielle de séquences de demandes de connexions différentes.

La validation est effectuée comme suit. A partir d'un simulateur codé en java et implémentant les divers algorithmes ainsi que les séquences de routage et d'assignation de longueur d'onde exposés au chapitre trois, on génère, à partir d'une matrice de trafic donnée, 100 séquences aléatoires d'établissement des connexions. A chaque séquence, on évalue le taux de blocage et la performance de chaque topologie testée, puis on efface toutes les connexions établies.

4.2.3.1 Matrices utilisées

Les matrices utilisées sont de plusieurs ordres :

- dès que la matrice est donnée (Betker et *al.*, 2005), comme dans le cas du réseau allemand à sept nœuds, alors il est possible de l'employer pour différencier les diverses topologies proposées;
- une matrice constante de type $T = k \cdot [U]$ où U est une matrice unitaire et k un scalaire nous permet de placer un ensemble de requêtes géographiquement uniforme. La matrice de trafic unitaire génère $N \cdot (N-1)$ demandes de connexions où N est le nombre de nœuds de la topologie. L'avantage étant aussi que l'on génère à chaque matrice un nombre identique de requêtes, ce qui permet de mieux comparer les topologies proposées;
- on peut aussi générer une matrice aléatoire (de loi exponentielle) qui permet de simuler une matrice de trafic réaliste tout en conservant encore une fois un nombre de requêtes globales similaire d'une matrice générée à une autre.

4.2.3.2 Définition des critères de performances pour la sélection des meilleures solutions topologiques issues de l'outil de design sans filtre

Nous nous attendons à pouvoir compter directement, en fonction du nombre de connexions demandées :

- le nombre de longueurs d'onde utilisées,
- le nombre total de canaux non filtrés,
- la longueur moyenne des connections qui ont pu être établies en kilomètres,
- le nombre de canaux bloqués,
- le nombre de canaux par lien optique.

Le nombre de canaux non filtrés sera compté comme suit : Pour chaque lien (i.e. port de sortie du nœud correspondant), compter les canaux qui ne sont pas filtrés et ne portent pas de signal utile, puis faire la moyenne sur tous les liens.

Nous rappelons en effet qu'un canal non filtré mobilise les ressources du réseau (amplificateurs OLA compris), et que le nombre de longueurs d'onde est physiquement limité pour chaque lien. Nous pensons ainsi que le taux de canaux non filtrés et la probabilité de blocage vont de pair.

4.2.3.3 Définition des critères de performances pour les solutions optiques sans filtre

Le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour résoudre une matrice de trafic donnée est une première contrainte (Archambault, 2008), dans la mesure où une solution optique sans filtre qui nécessite plus de 25% de longueurs d'onde supplémentaires par rapport à une solution photonique active est rejetée.

A ceci on ajoute le nombre de canaux non filtrés, présents dans les réseaux optiques sans filtre, et qui participent à la mobilisation des ressources sans porter pour autant de trafic utile. Il s'agit de signaux amplifiés qui, par le nécessaire évitement des collisions, participent à l'augmentation du nombre de longueurs d'onde.

Le but est de trouver une solution qui minimise la présence des canaux non filtrés. En effet, le faible nombre de ces canaux permet de réutiliser leurs longueurs d'onde associées, ce qui se traduit ultimement par une plus grande efficacité. Le nombre de canaux non filtrés est donc un précurseur du critère de performance précédemment décrit.

Par ailleurs on constate dans Archambault (2008) que les solutions optiques sans filtre présentent des demandes dont la longueur moyenne est plus grande que dans les réseaux optiques actifs. Trouver des solutions présentant des demandes globalement plus courtes présente deux avantages :

- la réduction de la latence permet d'attirer des profils de clients sensibles à cette problématique (i.e. transactions (*trading*) à haute fréquence);
- la réduction de la longueur des demandes se traduit, pour un réseau donné, à une diminution en moyenne du nombre de segments utilisés par demande, donc du nombre d'interfaces traversées. Plus l'on diminue le nombre d'interfaces traversées, et plus l'on diminue, pour une requête, le nombre de ports émetteurs en amont et en aval, donc les canaux qu'ils ont mobilisés. En conséquence de quoi on s'attend aussi à ce que des demandes plus courtes en moyenne réduisent le nombre de longueurs d'onde utilisées.

Nous proposons pour cela une métrique qui unifie le nombre de canaux non filtrés que le simulateur est aisément en mesure de compter, ainsi que la longueur moyenne des demandes. Elle permet de ramener à une valeur proche du nombre de canaux moyen par lien du réseau, donc de ramener à une estimation du taux d'occupation d'une fibre optique dans le réseau. Le calcul du nombre de canaux moyen par lien s'effectue comme suit :

$$N_{\text{canaux moyen par lien}} = \frac{N_{\text{canaux non filtrés}} + \frac{N_{\text{canaux}} * \text{Distance moyenne}_{\text{canaux}}}{\text{Distance moyenne}_{\text{liens}}}}{N_{\text{liens}}} \quad (4.2)$$

En conséquence de quoi, on s'attend à ce qu'une solution qui minimise à la fois la distance moyenne de ses requêtes et le nombre de ses canaux non filtrés est en mesure de présenter un

nombre de longueurs d'onde utilisées plus faible, et ultimement, de réduire le taux de blocage des requêtes à mesure que le réseau évolue.

Le taux de blocage est en effet le dernier critère de performance de ces réseaux. On s'attend en effet à ce que les réseaux optiques sans filtre possédant beaucoup d'arbres sont en mesure de réduire le nombre de canaux non filtrés et la longueur moyenne des connexions. En revanche, comme nous le verrons par la suite, si le réseau est trop fractionné, alors la probabilité de blocage risque de croître.

4.3 Résultats

4.3.1 Réseau allemand à sept nœuds

4.3.1.1 Présentation du réseau

Le réseau allemand à sept nœuds est un exemple de petit réseau (en nombre de nœuds, mais aussi en envergure, son diamètre étant de 690 km, cf. tableau 4.1). Il possède en outre onze liens bidirectionnels et donc un degré de connectivité moyen de 3,14. Tous ces paramètres sont particulièrement pratiques pour valider rapidement les concepts des réseaux optiques sans filtre. La figure 4.4 nous présente la topologie initiale (physique) du réseau sur lequel les outils de design ont proposé des solutions optiques sans filtre.

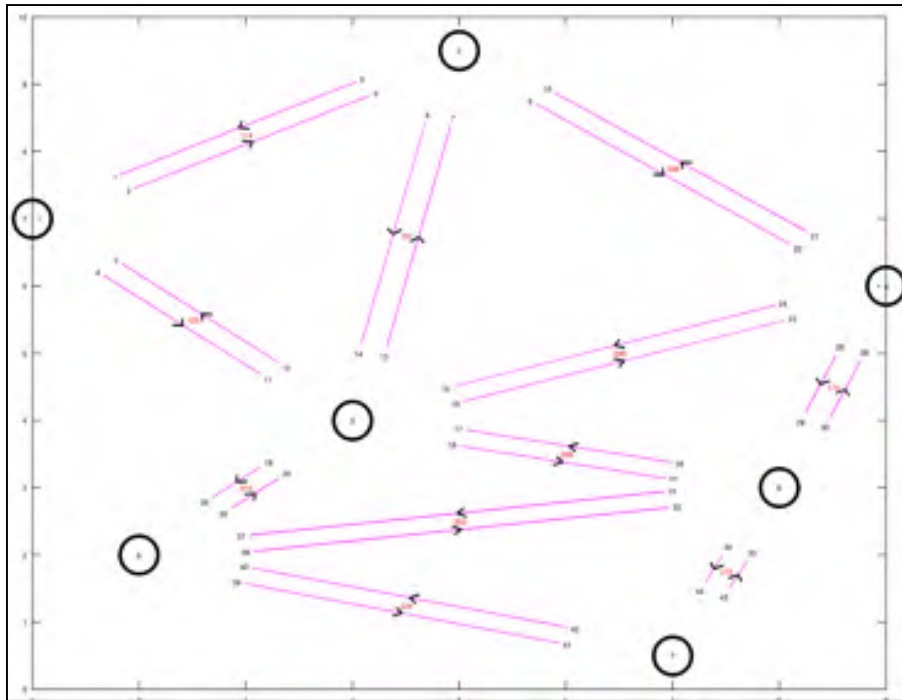


Figure 4.4 Topologie physique du réseau allemand à sept nœuds

La figure 4.5 présente ainsi six solutions optiques sans filtre issues des algorithmes génétiques. Celles-ci ont été retenues car elles présentaient un nombre de longueurs d'onde utilisées minimal, en plus d'un ratio de connectivité élevé (Archambault, 2008).

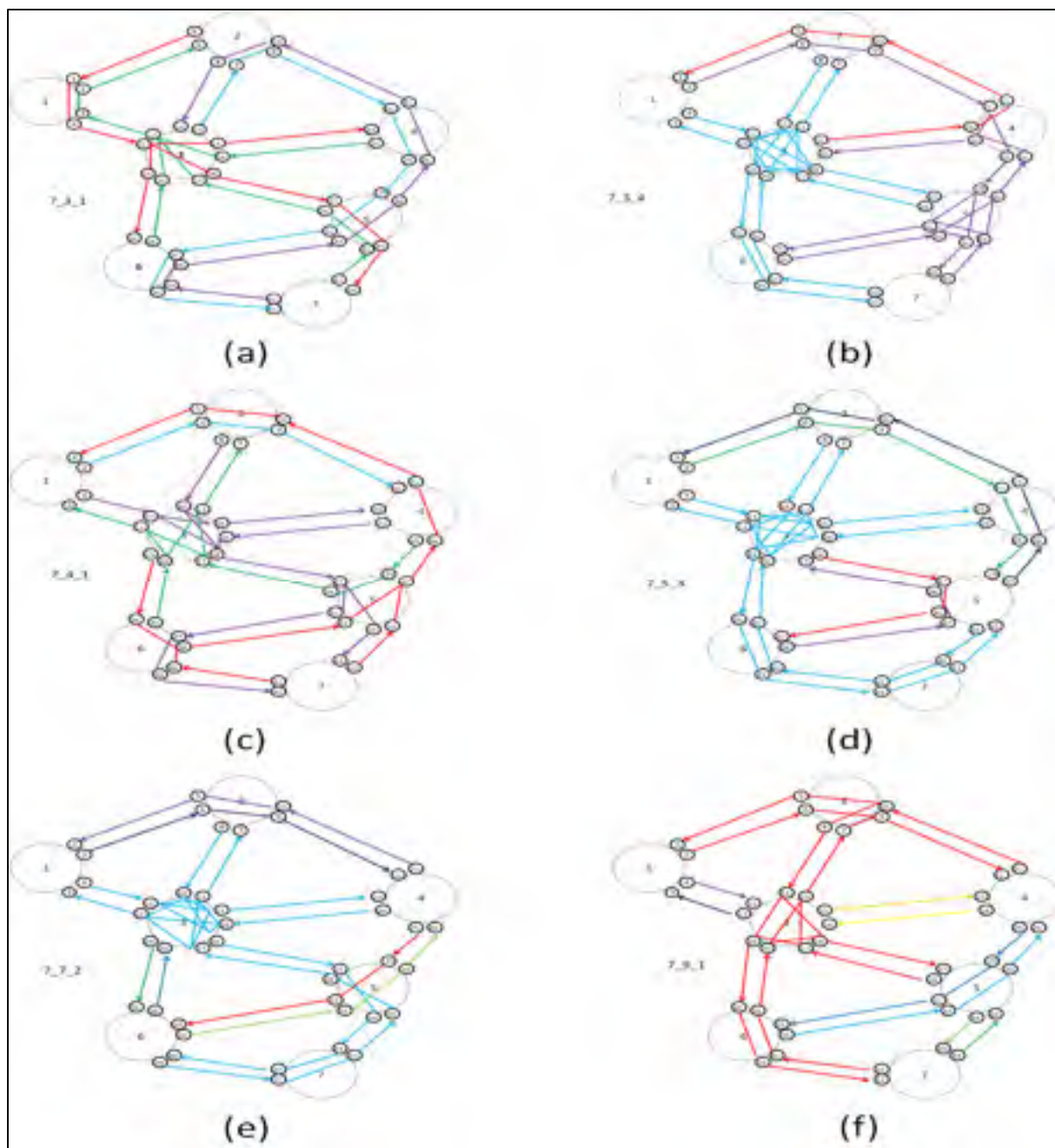


Figure 4.5 Présentation de six topologies candidates à trois arbres (a et b), à quatre (c), cinq (d), sept (e) et neuf (f) arbres

La première topologie présentée en (a) correspond à un réseau possédant trois arbres que l'on reconnaîtra comme étant celui de la figure 2.2, tout comme le réseau en (c). La figure (b) démontre une solution avec quatre arbres, mais il est possible d'en obtenir à cinq, sept et neuf

arbres (d, e et f respectivement). L'intérêt est de tester ici que plus il y a d'arbres, moins on rencontrera de canaux non filtrés. Le tableau 4.1 résume les paramètres généraux de ce type de réseau.

Tableau 4.1 Paramètres du réseau allemand à sept nœuds

| Paramètres | Valeurs |
|----------------------------------|---------|
| Nombre de nœuds | 7 |
| Nombre de liens unidirectionnels | 22 |
| Degré minimum des nœuds | 2 |
| Degré maximum des nœuds | 5 |
| Diamètre du réseau | 690 km |
| Longueur moyenne des liens | 235 km |

Les performances de la solution photonique active (cf. section 2.1.1) obtenue par *NetCalc Optical Planner 3.1TM* et présentée dans Archambault (2009) sont présentées au tableau 4.2, et utilisés à titre de comparaison :

Tableau 4.2 Critères de performance d'une solution photonique active

| Critères | Valeurs |
|---|---------|
| Nombre de longueurs d'onde | 35 |
| Nombre de canaux non filtrés | 0 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 352 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 10,08 |

La meilleure solution, dans le contexte d'établissement dynamique de connexions, est celle qui sera en mesure de présenter un nombre de longueurs d'onde le plus faible, inférieure à

43, comme mentionné dans la section 4.2.3.3, et de minimiser à la fois le nombre de canaux non filtrés et le nombre de canaux moyens par lien.

4.3.1.2 Réponse à une matrice de trafic

La matrice de trafic utilisée provient de Betker et *al.* (2004). Il s'agit d'un ensemble de 148 demandes de connexions qui ne sont pas réparties uniformément entre tous les nœuds de la topologie. Les résultats présentés dans le tableau 4.3 sont issus de la génération, et du calcul de la moyenne, de 100 séquences aléatoires d'établissement des connexions.

Tableau 4.3 Performances de solutions optiques sans filtre pour le réseau allemand à sept nœuds

| Critères | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Nombre de longueurs d'onde | 46,68 | 50,72 | 50,25 | 58,51 | 63,05 | 70,41 |
| Nombre de canaux non filtrés | 287,30 | 265,33 | 292,13 | 237,25 | 223,57 | 253,82 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 475,64 | 420,67 | 428,25 | 404,51 | 417,32 | 380,00 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 26,68 | 24,10 | 25,54 | 22,36 | 22,1 | 22,41 |

Comme on s'y attendait, les solutions qui minimisent le nombre de canaux moyen par lien sont celles qui disposent du plus grand nombre d'arbres. En effet, pour les connexions à courte distance, le PCE dispose de beaucoup d'arbres pour choisir sa route optimale, et en règle générale, il choisira ceux qui sont les moins achalandés. En revanche, et comme on peut le voir pour les solutions d, e et f, lorsqu'une connexion de plus longue distance est demandée, il ne reste plus qu'un arbre disponible. En conséquence, cet arbre est plus saturé, et ceci se traduit par un nombre de longueurs d'onde plus élevé.

Par contraste, les réseaux disposant du moins grand nombre d'arbres performant mieux en terme de nombre de longueurs d'onde utilisées, car quelque soit la longueur de la connexion demandée, le PCE a plus d'un arbre à sa disposition pour son routage. Il peut donc mieux équilibrer la charge. Mais parce que ces arbres « serpentent » à travers la topologie, les canaux non filtrés vont s'accumuler et les connexions sont en moyenne plus longues.

En conséquence, la topologie optimale est celle possédant le plus d'arbres les plus longs possible.

4.3.1.3 Probabilité de blocage

Pour estimer la probabilité de blocage, chaque topologie est testée avec des matrices uniformes produisant un nombre croissant de demandes de connexions. En effet, de telles matrices ont été utilisées dans les travaux antérieurs (Archambault, 2008) et leur réutilisation permet de valider les résultats obtenus à partir du simulateur. Ceci permet de suivre l'évolution de chaque solution sans filtre à mesure que le trafic croît.

La figure 4.5 présente le taux de blocage en fonction de la charge imposée sur le réseau et de la solution sans filtre obtenue à l'aide de l'outil de design sans filtre. Chaque courbe représente donc l'évolution du taux de blocage pour une solution sans filtre donnée parmi les six étudiées. Ce taux de blocage augmente donc à mesure que le nombre de connexions augmente.

On remarque que les solutions possédant le plus d'arbres (correspondant respectivement aux solutions à neuf, et à sept arbres) sont bien celles dont la probabilité de blocage est la plus élevée.

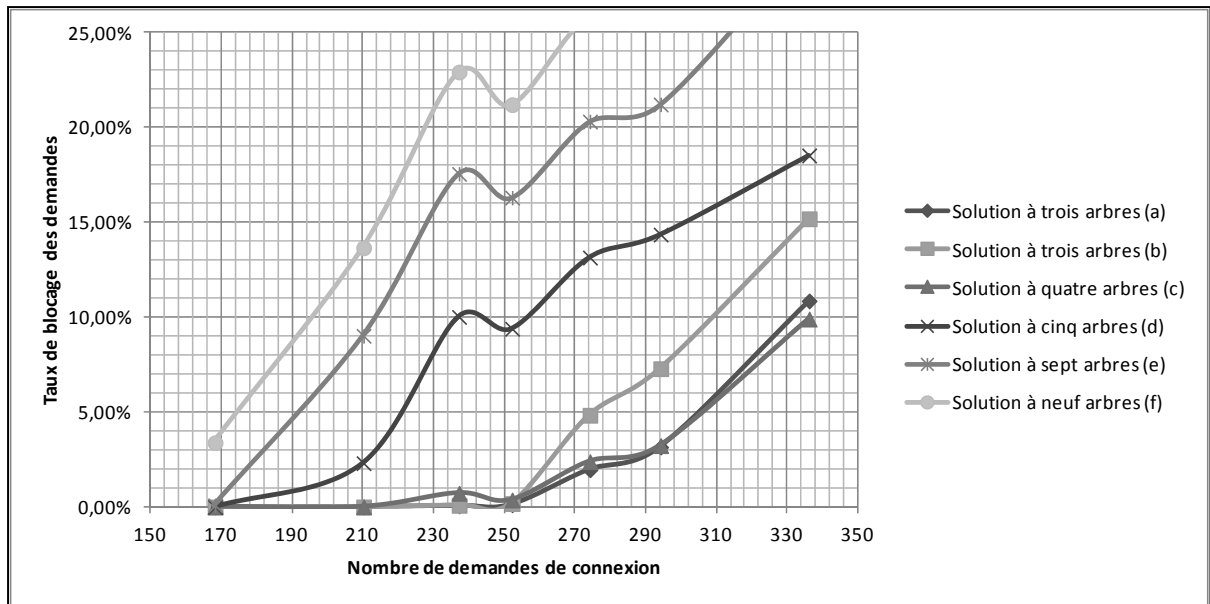


Figure 4.6 Taux de blocage du réseau allemand à sept nœuds en fonction du nombre de demandes de connexion et des solutions sans filtre obtenues par l'outil de design sans filtre

Le taux de blocage survient lorsque le PCE ne trouve plus d'arbre non saturé à disposition d'une demande de connexion. En effet, toute demande est en compétition pour un arbre quelconque ce qui signifie que par l'équilibrage de charge une connexion de courte distance peut réserver un arbre qui serait utile pour une connexion de longue distance.

Ceci signifie que le blocage apparaît lorsque les plus grands arbres sont saturés. Pour les réseaux à trois et quatre arbres, ceci apparaît plutôt vers 176 demandes de connexions, alors que dans le cas des réseaux ayant plus d'arbres, de petits arbres mobilisent des liens optiques et diminuent la formation de grands arbres. En conséquence, le blocage apparaît à plus faible charge, autour de 88 demandes de connexions.

De la même manière que vu précédemment, nous devons tenter de trouver un excellent compromis, c'est-à-dire trouver une solution qui présente le plus grand nombre d'arbres (de façon à réduire le nombre de canaux non filtrés) mais de plus grande envergure possible de façon à maximiser le nombre de choix potentiels pour le PCE lorsque des connexions de

longue distance doivent être établies et donc afin de réduire le nombre de longueurs d'onde utilisées et le taux de blocage.

4.3.2 Réseau italien à dix nœuds

4.3.2.1 Présentation du réseau

La figure 4.9 représente le réseau italien à dix nœuds. Il s'agit aussi ici d'un réseau métropolitain (son diamètre est de 830 km, cf. tableau 4.4). Les longueurs des liens, de 229 km en moyenne, en effet, sont équivalentes à celles du réseau précédent. Par ailleurs, pour un nombre de liens bidirectionnels de 15, le degré de connectivité, de trois, est aussi similaire à celui du réseau allemand à sept nœuds. La présence toutefois du nœud central fortement connecté peut présenter des risques quant à un éventuel nombre élevé de canaux non filtrés.

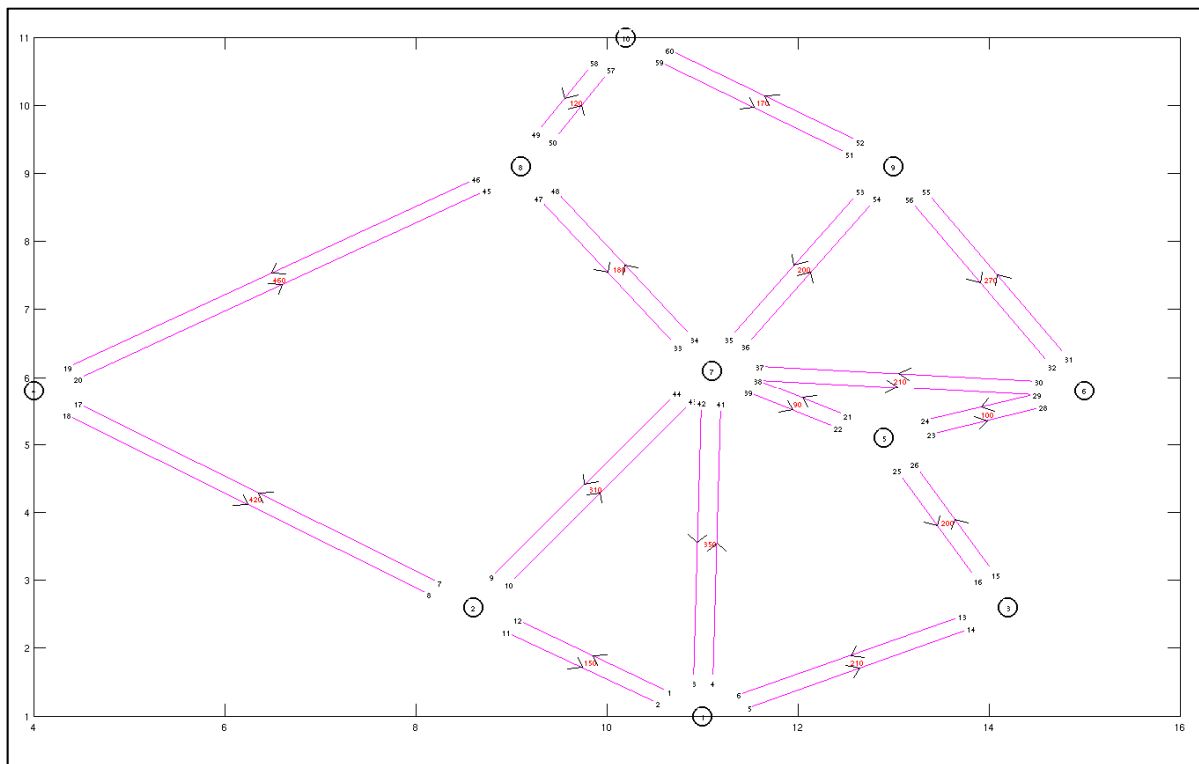


Figure 4.7 Topologie physique du réseau italien à dix nœuds

Quatre topologies sont aussi à l'étude (Archambault, 2009). Elles sont constituées respectivement de deux arbres pour la solution (a), de cinq arbres (b), et de sept arbres pour les solutions (c) et (d).

Tableau 4.4 Paramètres du réseau italien à dix nœuds

| Paramètres | Valeurs |
|----------------------------------|---------|
| Nombre de nœuds | 10 |
| Nombre de liens unidirectionnels | 30 |
| Degré minimum des nœuds | 2 |
| Degré maximum des nœuds | 6 |
| Diamètre du réseau | 830 km |
| Longueur moyenne des liens | 229 km |

Comme précédemment, Le tableau 4.5 présente les critères de performances d'un réseau optique actif obtenu par *NetCalc Optical Planner 3.1TM* et présentée dans Archambault (2009).

Tableau 4.5 Critères de performance d'une solution photonique active

| Critères | Valeurs |
|---|---------|
| Nombre de longueurs d'onde | 25 |
| Nombre de canaux non filtrés | 0 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 414 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 5,43 |

La matrice de trafic qui a permis d'obtenir les solutions proposées ici est une matrice uniforme, c'est-à-dire qu'une connexion est établie entre chaque paire de nœuds pris deux à deux. Malgré le nombre plus élevé de nœuds par rapport au réseau allemand à sept nœuds,

c'est un total de 90 demandes d'établissement de connexion sont générées (contre 148 dans l'étude précédente).

De la même manière, la meilleure solution, dans le contexte d'établissement dynamique de connexions, est celle qui sera en mesure de présenter un nombre de longueurs d'onde le plus faible, proche de 29 si possible (Archambault, 2009), et de minimiser à la fois le nombre de canaux non filtrés et le nombre de canaux moyen par lien.

4.3.2.2 Réponse à une matrice de trafic

Le tableau 4.6 présente, de la même manière que pour le réseau allemand à sept nœuds, les performances obtenues pour les solutions optiques sans filtre, dans le cadre d'un établissement dynamique des connexions.

Tableau 4.6 Performances de solutions optiques sans filtre pour le réseau italien à dix nœuds

| Critères | (a) | (b) | (c) | (d) |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Nombre de longueurs d'onde | 40,38 | 51,17 | 58,41 | 59,39 |
| Nombre de canaux non filtrés | 308,24 | 283,4 | 360,06 | 355,11 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 531,88 | 582,96 | 446,13 | 433,81 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 17,24 | 17,08 | 17,85 | 17,52 |

La tendance présentée dans la section 4.3.1 se confirme ici aussi. Plus l'on utilise d'arbres, et plus le nombre de longueurs d'onde augmente. En revanche, les solutions possédant le plus grand nombre d'arbres sont celles à même de diminuer le nombre de canaux non filtrés. Et, de la même manière, une solution qui présente le plus grand nombre d'arbres les plus longs possibles est celle qui offrira les meilleures performances.

4.3.2.3 Probabilité de blocage

La figure 4.8 illustre l'évolution du taux de blocage des demandes de connexions, à mesure que le nombre de celles-ci croît, chaque courbe représentant une des quatre solutions étudiées.

De la même manière que pour le réseau allemand à sept nœuds, la solution italienne à deux arbres performe mieux puisque, quelque soit la demande de connexion, elle dispose toujours de deux grands arbres, le blocage commence bien à apparaître autour de 176 demandes de connexions.

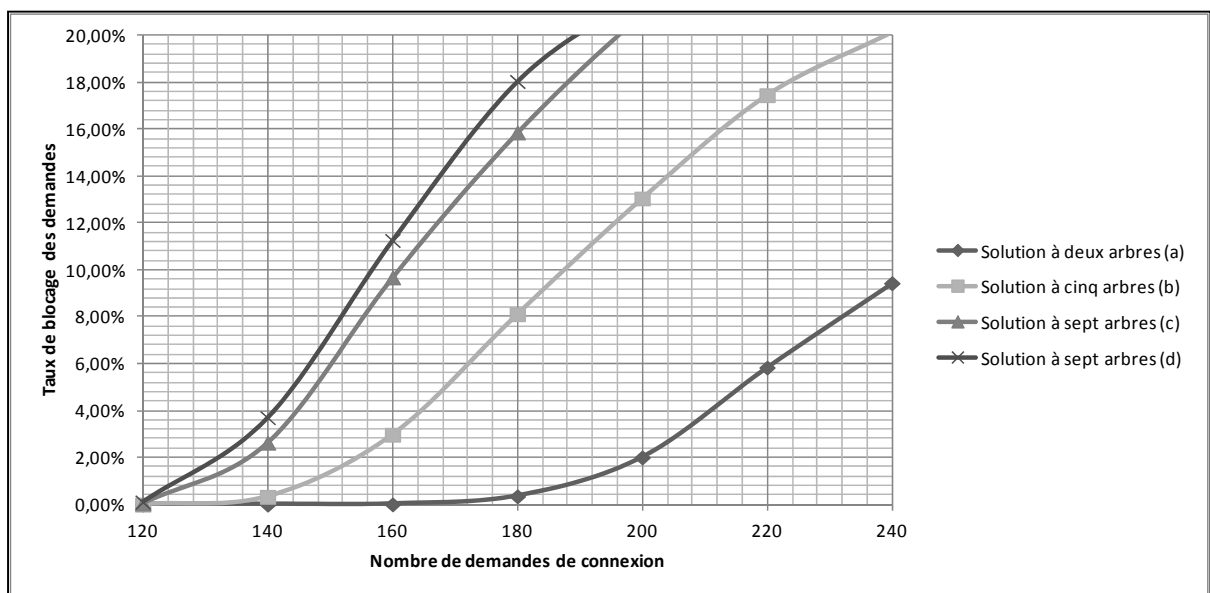


Figure 4.8 Taux de blocage pour le réseau italien à 10 nœuds en fonction du nombre de demandes de connexion et des solutions obtenues à partir de l'outil de design sans filtre

En revanche, les solutions qui déploient plus d'arbres ont tendance à ne laisser apparaître qu'un seul arbre de grande envergure et plusieurs arbres petits. Les connexions dont les distances sont courtes sont celles qui souffrent le moins du blocage, le PCE a toujours des petits arbres peu saturés à leur proposer. En revanche, les connexions dont les distances sont longues ont peu de choix quant aux arbres disponibles et ceux-ci sont vite saturés.

En conséquence, on s'attend à ce que les solutions présentant beaucoup d'arbres possèdent un blocage à partir de 88 demandes de connexions, et que ce taux augmente à mesure que le nombre d'arbres augmente, ce que l'on voit dans la figure 4.8, les réseaux avec sept arbres (solutions c et d) exhibent un taux de blocage supérieurs aux réseaux à cinq arbres et à deux (solutions a et b).

4.3.3 Réseau allemand à dix-sept nœuds

La figure 4.9 représente le réseau allemand à dix-sept nœuds et couvre la région complète de l'Allemagne (et possède donc un diamètre de 951 km, cf. tableau 4.7).

La présence de villes un peu moins importantes dans la topologie entraîne que la longueur moyenne des liens optiques est plus petite (170 km contre 235 pour le réseau allemand à sept nœuds précédemment décrit). Le degré de connectivité de 3,06 est encore ici équivalent aux deux réseaux précédents, mais l'on note la présence d'un nœud central dont le degré est de six, ce qui peut ici aussi générer des contraintes pour les réseaux optiques sans filtre.

Par ailleurs, le nombre de nœuds plus élevé peut engendrer plus de trafic sur les arbres. Donc on se retrouve sur une situation où le nombre de canaux non filtrés peut entraîner le blocage de nouvelles demandes de connexions.

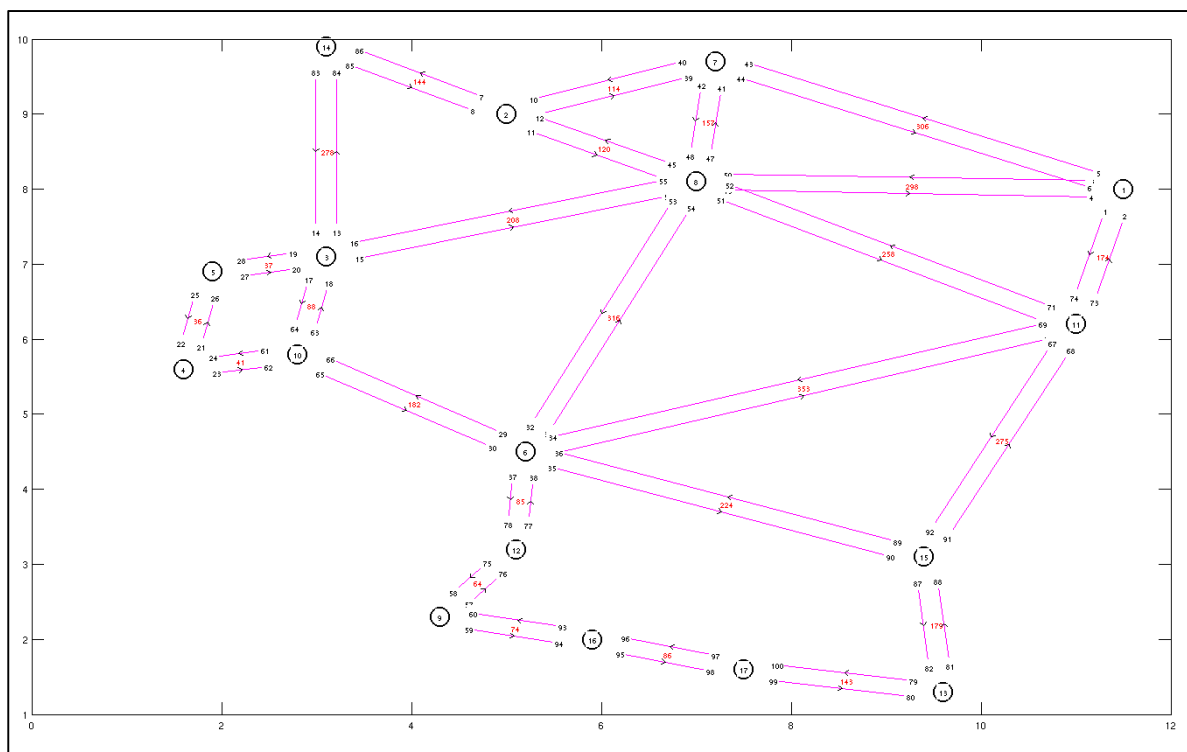


Figure 4.9 Topologie physique du réseau allemand à dix-sept nœuds

Quatre topologies sont aussi comparées, toutes issues comme précédemment de travaux antérieurs (Archambault, 2009). Elles sont constituées respectivement de deux pour la solution (a), quatre (b), quatre (c) et huit arbres pour la dernière solution (d).

Tableau 4.7 Paramètres du réseau allemand à dix sept nœuds

| Paramètres | Valeurs |
|----------------------------------|---------|
| Nombre de nœuds | 17 |
| Nombre de liens unidirectionnels | 52 |
| Degré minimum des nœuds | 2 |
| Degré maximum des nœuds | 6 |
| Diamètre du réseau | 951 km |
| Longueur moyenne des liens | 170 km |

Comme précédemment, Le tableau 4.8 présente les critères de performances d'un réseau optique actif obtenu par *NetCalc Optical Planner 3.1TM* et présentée dans Archambault (2009).

Comme pour le réseau italien à 10 nœuds, la matrice de trafic qui a permis d'obtenir les solutions proposées ici est une matrice uniforme et génère donc un total de 272 demandes d'établissement de connexions.

Tableau 4.8 Critères de performance d'une solution photonique active

| Critères | Valeurs |
|---|---------|
| Nombre de longueurs d'onde | 69 |
| Nombre de canaux non filtrés | 0 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 439 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 13,51 |

De la même manière, la meilleure solution, dans le contexte d'établissement dynamique de connexions, est celle qui sera en mesure de présenter un nombre de longueurs d'onde le plus faible, proche de 86 si possible (Archambault, 2009), et de minimiser à la fois le nombre de canaux non filtrés et le nombre de canaux moyen par lien.

4.3.3.1 Réponse à une matrice de trafic

Le tableau 4.9 présente les performances offertes par les solutions optiques sans filtre issues de l'outil de design sans filtre (Archambault, 2009).

Dans le cas précis, un arbre parvenu à sa saturation provoque l'apparition de blocage pour des requêtes. Ce phénomène de blocage apparait de plus en plus important à mesure que le nombre d'arbres augmente.

Tableau 4.9 Performances de solutions optiques sans filtre pour le réseau allemand à dix-sept nœuds

| Critères | (a) | (b) | (c) | (d) |
|---|----------|----------|--------|--------|
| Nombre de longueurs d'onde | 88 | 88 | 88 | 88 |
| Nombre de canaux non filtrés | 1 377,54 | 1 108,88 | 989,67 | 918,92 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 483,77 | 612,67 | 576,22 | 523,61 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 37,89 | 35,20 | 30,92 | 19,88 |

4.3.3.2 Probabilité de blocage

La figure 4.10 présente l'évolution du taux de blocage pour le réseau allemand à dix-sept nœuds, en fonction du nombre de demandes de connexions, chaque courbe appartenant à une des quatre solutions étudiées.

On remarque que ce taux de blocage commence à être non négligeable avant les 176 connexions, ce qui signifie que, même pour les solutions possédant peu d'arbres, il y a saturation et blocage. Ceci est lié dans ce cas précis à l'accumulation des canaux non filtrés car trop de nœuds mutualisent les arbres.

On remarque toutefois que la solution possédant huit arbres (solution d) est celle dont la courbe de blocage croît le plus vite, par rapport aux solutions à quatre arbres (solutions b et c) et à deux arbres (solution a).

Il faut envisager deux cas ici. Soit partitionner la topologie en îlots (Enriquez, 2010), soit recourir à des filtres pour espérer diminuer le nombre de canaux non filtrés, comme expliqué plus loin.

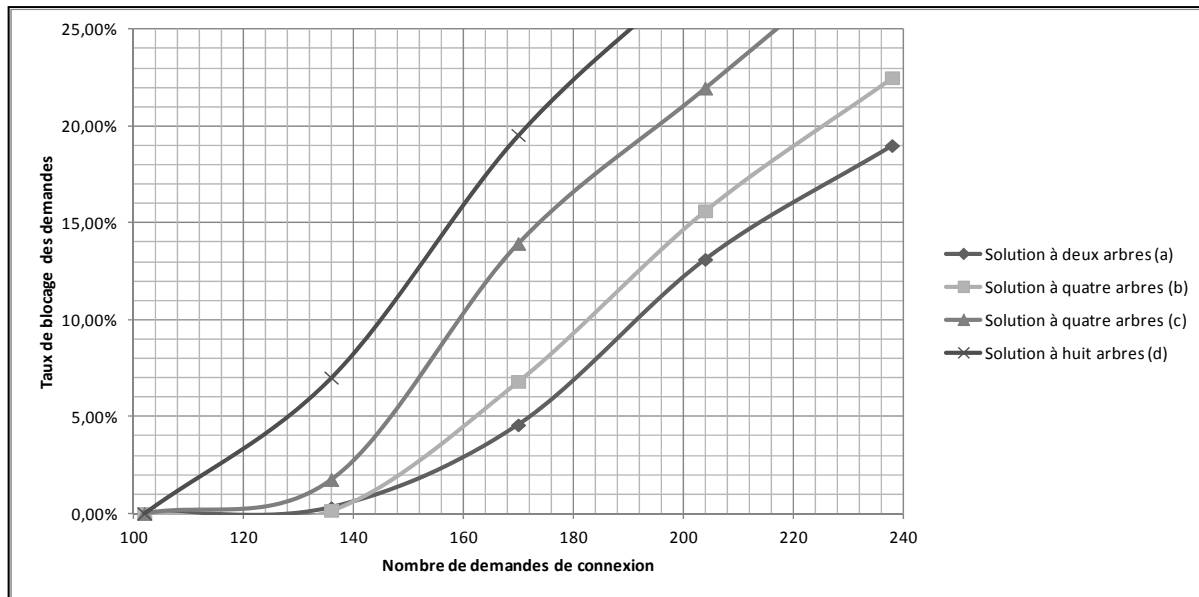


Figure 4.10 Taux de blocage pour le réseau allemand à 17 nœuds en fonction du nombre de demandes de connexion et des solutions obtenues à partir de l'outil de design sans filtre

4.3.4 Analyse des résultats

4.3.4.1 Performances de cinquante-sept solutions sans filtre pour le réseau allemand à sept nœuds

Les mesures effectuées dans la section 4.3.1 sont portées ici à l'ensemble des solutions proposées par l'outil de design sans filtre (Archambault, 2009). C'est donc sur un total de 57 solutions sans filtre que l'on étudie les critères de performances, à partir de la matrice de Betker et *al.* (2004) générant un total de 148 demandes de connexions.

La figure 4.11 représente la métrique telle que décrite dans la section 4.2.3.3, c'est-à-dire qu'il s'agit de la représentation du nombre de canaux moyens par lien, prenant en compte simultanément :

- du nombre de canaux non filtrés,
- de la longueur moyenne des connexions optiques établies.

Par conséquent, une solution sans filtre qui minimise à la fois le nombre de longueurs d'onde et cette métrique est sélectionnée comme étant la meilleure solution sans filtre pour la topologie physique et la matrice de trafic demandée.

Dans la figure 4.11 sont présentées des solutions asymétriques et symétriques. La définition de ces solutions particulières dépendent de l'algorithme utilisé et sont présentées dans Enriquez (2010, p. 18). Une solution topologique symétrique est un cas particulier de solution sans filtre présentant une contrainte supplémentaire dans sa réalisation. Les arbres passifs sont ainsi construits symétriquement : pour les deux liens unidirectionnels qui joignent deux nœuds, à un arbre passif d'un des liens correspond toujours un même autre arbre passif dans le lien opposé (cf. figure 4.5 (a)). Au contraire, une solution asymétrique propose des arbres indépendamment de cette contrainte (cf. figure 4.5, (b)).

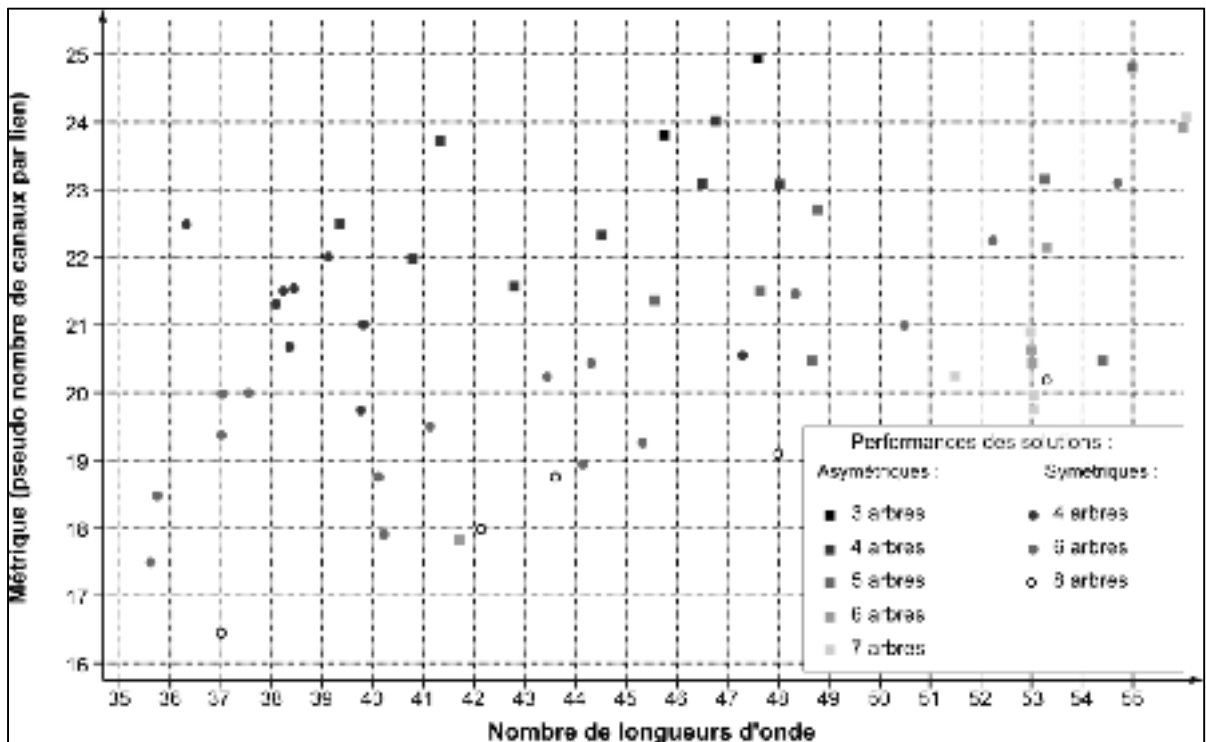


Figure 4.11 Performances de cinquante-sept solutions sans filtre pour le réseau allemand à sept nœuds

Chaque point de la constellation de la figure 4.11 correspond aux performances d'une solution sans filtre, et cette première démontre que :

- l'inefficacité relative des solutions asymétriques est apparente. On voit globalement que les carrés se répartissent le haut du graphique, c'est-à-dire que par rapport aux solutions symétriques le nombre de canaux non filtrés générés et/ou la longueur moyenne des connexions y est plus grande;
- comme l'on s'y attendait, plus on ajoute d'arbres et plus le nombre moyen de canaux par lien diminue. Les solutions avec un plus grand nombre d'arbres se répartissent ainsi préférentiellement sur le bas du graphique; en revanche, la relation entre le nombre d'arbres et le nombre de longueurs d'onde utilisées est, malheureusement, impossible à prédire;
- il y a une corrélation faible entre le nombre de canaux moyen par lien et le nombre de longueurs d'onde, comme nous nous en étions doutés dans la section 4.2.3.3, les canaux non filtrés et une plus grande longueur moyenne des connexions se traduisent par une hausse du nombre de longueurs d'onde utilisées.

4.3.4.2 Sélection de la meilleure solution du réseau allemand à sept nœuds

De fait, si l'on ne veut pas que le nombre de longueurs d'ondes dépasse 25% d'une solution photonique active (Archambault, 2009), alors on ne considère que celles qui nécessitent moins de 43 longueurs d'onde pour fonctionner. De la figure 4.11 on élimine donc toutes les solutions sans filtre dont la valeur en abscisse excède 43. Ceci nous laisse donc encore 23 solutions potentielles.

Les solutions qui présentent les meilleures performances apparaissent en bas à gauche de la figure 4.11. Ce sont celles qui sont en mesure de minimiser à la fois le nombre de canaux moyen par lien et le nombre de longueurs d'onde nécessaires. Les deux solutions retenues sont présentées dans la figure 4.12 et sont obtenues à partir de la figure 4.11. L'une possède quatre arbres et l'autre huit arbres.

Selon que l'on voudra, dans le compromis, minimiser :

- le nombre de longueurs d'onde, on choisira la solution avec le moins d'arbres, donc celle en a;
- le nombre de canaux non filtrés et la longueur moyenne des connexions, on choisira plutôt celle avec le plus d'arbres, donc celle en b.

Tableau 4.10 Comparaison des solutions sans filtre obtenues à partir de la figure 4.11 avec les solutions photoniques actives pour le réseau allemand à sept nœuds

| Critères | Solution (a) | | Solution (b) | | Solution photonique active |
|---|--------------|----------|--------------|----------|----------------------------------|
| | Dynamique | Statique | Dynamique | Statique | |
| Nombre de longueurs d'onde | 34,61 | 33 | 37 | 33 | 35 |
| Nombre de canaux non filtrés | 146,31 | 142 | 144 | 129 | 0 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 379,31 | 349,55 | 349,55 | 349,55 | 352 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 17,51 | 16,46 | 16,55 | 15,87 | 10,08 |

Les performances demeurent correctes, en ce qui concerne le nombre de longueurs d'onde utilisées par exemple, nous sommes bien, en deçà des 25% par rapport à un réseau optique actif comme évoqué dans Archambault (2009), ce qui valide la proposition.

On remarque aussi que dans le cas de la solution a, le nombre de canaux non filtrés demeure proche de celui d'une solution statique. En conséquence, le système proposé est en mesure non seulement de gérer les collisions de longueurs d'onde induite par les canaux non filtrés, mais aussi de les réduire de manière plutôt efficace.

4.3.4.4 Performance de vingt-deux solutions sans filtre pour le réseau italien à dix nœuds

De la même manière que précédemment, 22 solutions ont été passées au crible, et l'on fait ici la sélection de la meilleure d'entre elles. La figure 4.13 représente la constellation de performances de ces 22 solutions.

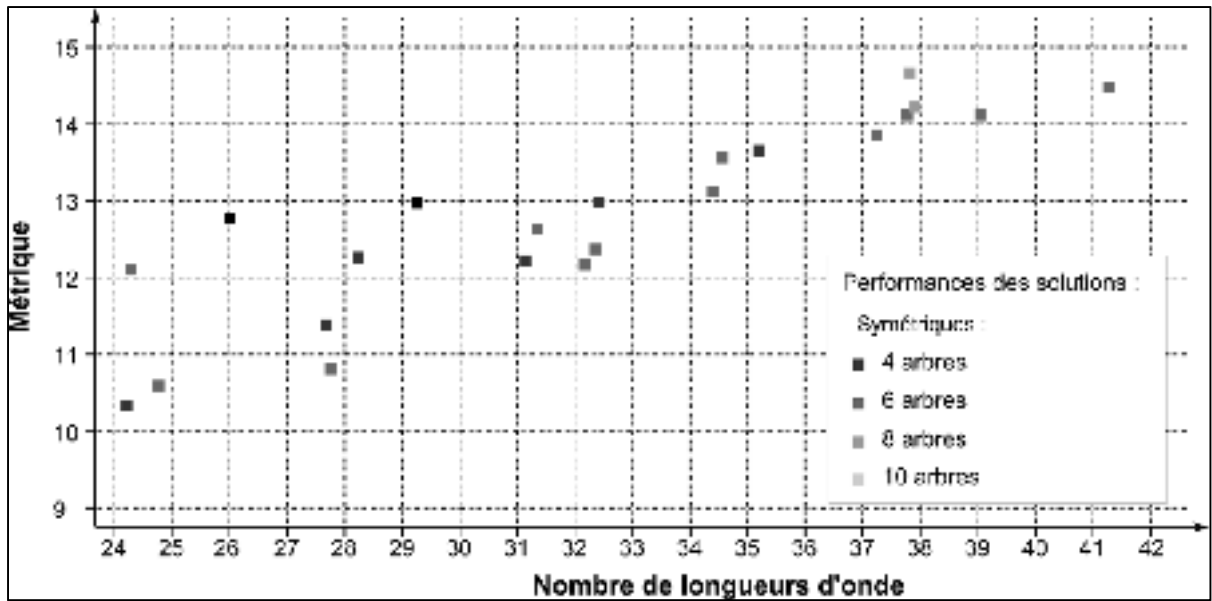


Figure 4.13 Performances de 22 solutions pour le réseau italien à dix nœuds

La solution qui nous apparaît la meilleure est donc une solution possédant six arbres, demandant en moyenne 24,15 longueurs d'onde et étant capable de juguler au mieux les canaux non filtrés, soit celle présentée à la figure 4.



Figure 4.14 Sélection de la meilleure solution pour le réseau italien à dix nœuds

Le tableau 4.11 présente les performances comparatives entre la solution dynamique, la solution statique et la solution photonique active. On remarque que la solution sans filtre dynamique proposée par le chapitre trois se défend bien et confirme les résultats obtenus à l'aide des outils de (Archambault, 2009).

Tableau 4.11 Comparaison de la solution sans filtre obtenue à partir de la figure 4.14 avec les solutions photoniques actives pour le réseau italien à dix nœuds

| Critères | Solution (a) | | Solution photonique active |
|---|--------------|----------|----------------------------|
| | Dynamique | Statique | |
| Nombre de longueurs d'onde | 24,15 | 23,75 | 25 |
| Nombre de canaux non filtrés | 136,08 | 136,25 | 0 |
| Longueur moyenne des connexions (en km) | 445,06 | 434,72 | 414 |
| Nombre de canaux moyen par lien | 10,37 | 10,24 | 5,43 |

4.3.4.5 Cas des réseaux à grand nombre de nœuds

Nous avons vu que le plan de contrôle proposé au chapitre trois propose des solutions de RWA qui sont acceptables si on les compare aux solutions statiques proposées par Archambault (2009), en ce qui concerne les réseaux possédant une charge de trafic modérée, ainsi qu'un faible nombre de nœuds, et dans les conditions d'établissement dynamique de connexions optiques.

Les choses se compliquent lorsque la charge augmente ainsi que le nombre de nœuds. Par exemple si le nombre de nœuds augmente par arbre, alors l'accumulation des canaux non filtrés y est telle qu'il devient difficile d'ajouter de nouvelles connexions. Si trop d'arbres sont proposés pour une solution, il est possible qu'un trop faible nombre de grands arbres soit offert pour le PCE et le taux de blocage augmente en conséquence. De ce fait, le simulateur

de plan de contrôle proposé n'a pas été en mesure de satisfaire toutes les demandes d'établissement de connexion pour le réseau allemand possédant 17 nœuds.

Nous proposons plusieurs solutions pour circonvenir cette problématique :

- utiliser plusieurs arbres de suite pour établir une connexion. Ceci impose d'employer de la régénération optoélectronique comme dans les réseaux opaques vus dans le chapitre un. Malheureusement, ceci se traduit par une hausse des coûts ainsi qu'une hausse du nombre de canaux non filtrés. Il vaut mieux éviter d'employer une telle solution;
- nous avons vu au chapitre deux que les réseaux optiques sans filtre permettent d'implémenter le concept de piste optique aux arbres optiques passifs. Ainsi, on est en mesure d'effectuer du « *traffic grooming* », donc de répartir le trafic des couches supérieures sur les différentes longueurs d'onde, ce qui se traduit par une hausse de la performance. Malheureusement, Ye (2005) a démontré qu'au-delà d'une certaine charge de trafic, c'est bien toujours le nombre de longueurs d'onde par fibre optique qui demeure une limite;
- le fractionnement du réseau en îlots est une autre solution (Enriquez, 2010). En créant des sous réseaux de taille inférieure, on revient aux conditions qui rendent la solution proposée efficace. Ceci passe donc par le placement optimal de nœuds régénérateurs, de façon à éviter les hausses de coûts et de canaux non filtrés discuté précédemment;
- conjointement, le placement de filtres à des endroits clé du réseau permettent la diminution du nombre de canaux non filtrés, et par là même, le nombre de longueurs d'onde utilisées.

On constate enfin qu'il ne peut passer qu'un arbre à travers un nœud de degré deux. Donc, on suppose (cf. figure 4.12) que les nœuds de degré deux qui terminent ou débutent les arbres permettent une hausse de la performance de ces solutions.

4.3.4.6 Parallèle avec les réseaux optiques semi sans filtre

Le placement des filtres à des endroits stratégiques du réseau, en vue de diminuer le nombre de canaux filtrés, nous apparaît potentiellement intéressant. Il fait présentement l'objet d'une

étude approfondie (Khanmohamadi et *al.*, 2011) en ce qui à trait aux réseaux optiques semi sans filtre, tels que décrits dans la section 2.3.3.

La figure 4.15 présente l'évolution du nombre de longueurs d'onde utilisée dans les réseaux de référence en fonction du nombre de filtres sélectifs en longueur d'onde et passifs placés dans la topologie. On voit qu'avec un nombre optimal de filtres, il est possible de réduire le nombre de longueurs d'onde utilisées.

Nous faisons le postulat que le nombre de longueurs d'onde utilisées ainsi que le nombre de canaux moyen par lien proposé diminue de la même manière que dans la figure 4.15 pour le plan de contrôle proposé au chapitre trois, et tel qu'évoqué dans la section 3.5.5, dans les conditions d'un établissement dynamique des connexions optiques.

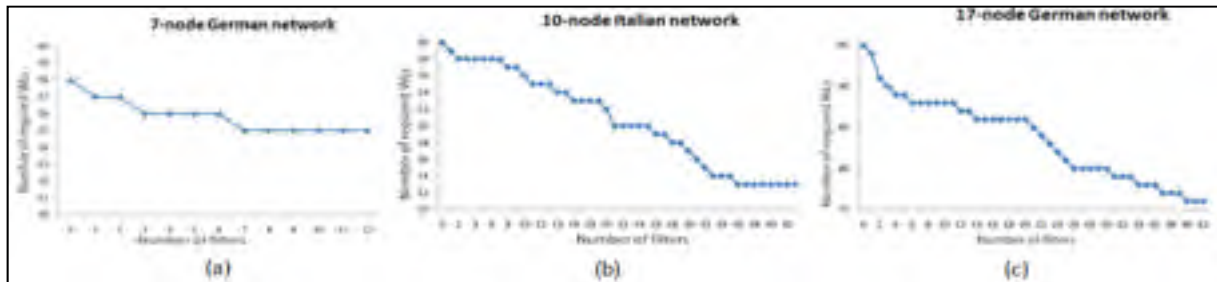


Figure 4.15 Nombre de longueurs d'onde utilisées en fonction du nombre de filtres pour les réseaux allemand à sept nœuds (a), italien à dix nœuds (b), et allemand à 17 nœuds (c)

Tirée de Khanmohamadi et *al.* (2011, p.3)

4.3.5 Généralisation de la méthode à un ensemble de réseaux

Il est possible d'effectuer les mesures décrites dans les sections précédentes et de les généraliser à un ensemble plus vaste de réseaux, comme présenté dans le tableau 4.12. Celui-ci fait en effet le résumé des solutions sans filtre sélectionnées et en présente d'autres (Archambault, 2009) obtenues à partir d'autres réseaux, dont le réseau européen à 8 nœuds, le réseau est américain à 11 nœuds, et le réseau californien à dix-sept nœuds, tous à l'aide de matrices de trafic unitaires générant respectivement 56, 110 et 272 demandes de connexion.

Les chiffres entre parenthèses sont un rappel, dans le cas du nombre de longueurs d'onde utilisées, du nombre de demandes de connexions, et dans le cas du nombre de canaux moyen par lien, du nombre de canaux non filtrés présents dans la topologie.

On constate du tableau 4.12 qu'à mesure que le réseau croît en taille, le nombre de longueurs d'onde utilisées augmente pour atteindre la limite permise et donc la saturation. On le constate bien pour le réseau allemand à dix-sept nœuds d'une part, et le réseau californien à dix-sept nœuds d'autre part.







Toutefois, les performances sont meilleures dans le cas du réseau allemand à dix-sept nœuds par rapport au réseau italien à dix-sept nœuds, alors que nombre de nœuds et nombre de demandes de connexions sont identiques. On note toutefois que le deuxième réseau dispose de moins de liens, donc d'un degré de connectivité moyen moindre, et en bout de ligne (Archambault, 2009), d'un taux de connexion plus faible.

Dans le cadre de notre validation, ceci signifie que le PCE dispose globalement de moins d'arbres à choisir pour le routage des connexions optiques, et donc, que les rares arbres à disposition sont vite saturés.

On remarque en outre que le réseau est américain à onze nœuds, dispose à peu près du même degré de connectivité moyen que le réseau californien, or il est voisin du réseau italien, en nombre de nœuds d'une part, mais aussi en nombre de connexions. Or, les performances y sont moindres.

Conclusion, les réseaux optiques sans filtre performant bien dans les réseaux de petites tailles, d'une dizaine de nœuds maximum et le plus fortement maillé possible, c'est-à-dire, présentant un degré de connectivité moyen élevé (i.e. supérieur à trois).

Tableau 4.12 Présentation des meilleures solutions sans filtre pour les six réseaux de référence proposés

| Réseau | Topologie physique | Propriétés physiques | | | | |
|---------------------------------|---|----------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| | | Nombre de liens | Degré de connectivité moyen | Nombre d'arbres | Nombre de longueurs d'onde utilisées | Nombre moyen de canaux par lien |
| Réseau allemand (7 nœuds) |  | 22 | 3,14 | 4 | 34,61 (148) | 17,51 (146,31) |
| Réseau italien (10 nœuds) |  | 30 | 3 | 6 | 24,15 (90) | 10,37 (136,08) |
| Réseau allemand (17 nœuds) |  | 52 | 3,06 | 14 | 88 (272) | 38,89 (421,08) |
| Réseau européen (8 nœuds) |  | 24 | 3 | 2 | 21,51 (56) | 10,43 (144,46) |
| Réseau Est-américain (11 nœuds) |  | 24 | 2,18 | 5 | 78,2 (110) | (29,15) (390) |
| Réseau californien (17 nœuds) |  | 40 | 2,35 | 5 | 88 (272) | 68,54 (1 496,27) |

CHAPITRE 5

ÉTUDE DES COÛTS ET DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

Dans ce chapitre qui explique plus en détail l'article soumis à la revue ECOC 2012 (Abtahi *et al.*, 2012), nous effectuons l'étude des réseaux optiques sans filtre vis-à-vis des réseaux optiques à commutation active pour les six réseaux de référence identifiés dans le tableau 4.12, à l'aide de leur matrice de trafic respective.

Dans un premier temps, nous esquissons les hypothèses, puis l'énumération des différents composants d'une ligne de transmission optique (tels, les amplificateurs, les transpondeurs, les commutateurs etc.) est effectuée pour chacun de ces réseaux. Ensuite, les valeurs de coût et de consommation électrique de chaque composant sont présentées. Une fois cette étape effectuée, l'étude des coûts et de la consommation électrique est portée aux six réseaux de références étudiés au chapitre quatre, à savoir :

- le réseau allemand à sept nœuds,
- le réseau italien à dix nœuds,
- le réseau allemand à dix-sept nœuds,
- le réseau européen à huit nœuds,
- le réseau est-américain à onze nœuds,
- le réseau californien à dix-sept nœuds.

À terme, nous démontrons dans quelle mesure les coûts et la consommation électrique des réseaux optiques sans filtre est diminuée comparativement aux réseaux actifs, précisément grâce au remplacement des commutateurs sélectifs en longueurs d'onde par des diviseurs et des combineurs de puissance optique passifs à faible coût et à consommation électrique nulle.

D'un autre côté, l'usage de transpondeurs possédant des dispositifs de compensation électronique de la dispersion accroît les coûts et la consommation électrique pour les réseaux

optiques sans filtre vis-à-vis de leur contrepartie active. C'est pourquoi, nous produisons en plus, pour chaque réseau, le nombre de transpondeurs (ou de connexions à établir) à partir duquel un réseau optique sans filtre est plus coûteux et consomme davantage qu'un réseau optique actif.

5.1 Règles de calcul des différents composants de chaque réseau

Trois éléments du réseau sont pris en compte dans le calcul des coûts et de la consommation électrique :

- les transpondeurs, car ils effectuent de la compensation électronique de la dispersion pour les réseaux optiques sans filtre, au contraire des réseaux optiques actifs;
- la commutation qui est pressentie comme présentant la différence majeure dans les coûts entre un réseau optique sans filtre, basée sur des diviseurs et des combineurs de puissance optique passif, et un réseau optique actif, basé sur des ROADM constitués, par exemple, de WSS;
- enfin l'amplification peut présenter une source de différence des coûts dans la mesure où, dans le cas des réseaux optiques actifs, deux étages sont nécessaires pour compenser les pertes induites par la fibre DCF, alors qu'un seul est requis pour les réseaux optiques sans filtre.

Pour effectuer l'étude, nous devons en outre retenir deux parties des réseaux en général : les nœuds et les lignes de transmission. Pour ce qui est des nœuds, on pourra se référer aux figures 2.5 et 2.6 présentant les architectures nodales. En ce qui concerne les lignes de transmission enfin, on se réfèrera aux figures 2.4 et 5.1.

5.1.1 Nombre de transpondeurs dans un réseau

Le nombre de transpondeurs nécessaires dans un réseau donné est déterminé par sa matrice de trafic, ou encore, le nombre de demandes de connexion générées. A l'exception du réseau allemand à sept nœuds, les matrices de trafic sont unitaires pour chaque réseau.

Notez que dans le cas des réseaux transparents, l'hypothèse retenue est que les réseaux étudiés sont de dimension inférieure à celle pour laquelle la régénération du signal est nécessaire (1500 km). Donc, pour une demande de connexion, nous avons besoin d'un seul transpondeur.

Le nombre de connexions par réseau, soit le nombre de transpondeurs requis, est donc de :

- le réseau allemand à sept nœuds possède 148 demandes de connexion,
- le réseau italien à dix nœuds en possède 90,
- les réseaux allemand et californien à dix-sept nœuds en disposent de 272,
- le réseau européen à huit nœuds en a 56,
- et le réseau est américain à onze nœuds 110.

Pour rappel, les réseaux optiques sans filtre emploient des transpondeurs munis de dispositifs de compensation électronique de la dispersion et de modules de traitement numérique du signal, alors que les réseaux actifs utilisent des transpondeurs sans ces modules.

5.1.2 Nombre d'amplificateurs optiques dans un réseau

Le nombre d'amplificateurs requis dans un réseau est la somme :

- du nombre d'amplificateurs optiques de chaque nœud,
- du nombre d'amplificateurs optiques de tous les liens du réseau.

Ce nombre peut être calculé comme suit :

$$N_{\text{amplificateurs}} = \sum_{i=0}^{i \leq N} D_{\text{noeud}_i} + \sum_{i=0}^{i \leq L} E \left(\frac{\text{Longueur}_{\text{lien}_i}}{\text{Longueur}_{\text{span}}} \right) \quad (5.1)$$

Le premier terme de l'équation (5.1) correspond au nombre d'amplificateurs de chaque nœud. On déduit des figures 2.5 et 2.6 que le nombre d'amplificateurs requis est égal au degré de connectivité du nœud. Donc cette somme vaut le nombre de liens du réseau.

Le deuxième terme de l'équation prend la partie entière du rapport entre la longueur d'un lien et la longueur d'une section de fibre optique entre deux sites d'amplification, dont nous faisons l'hypothèse qu'elle vaut 80 km. Cette valeur est spécifique au réseau, et peut être relativement corrélée à la longueur moyenne des liens.

La figure 5.1 présente la différence entre un amplificateur pour les réseaux optiques actifs (en a) où l'on voit bien la fibre DCF insérée entre deux étages d'amplification, et un amplificateur optique pour réseau sans filtre (en b), où fibre DCF et étage d'amplification associé ont été retirés.

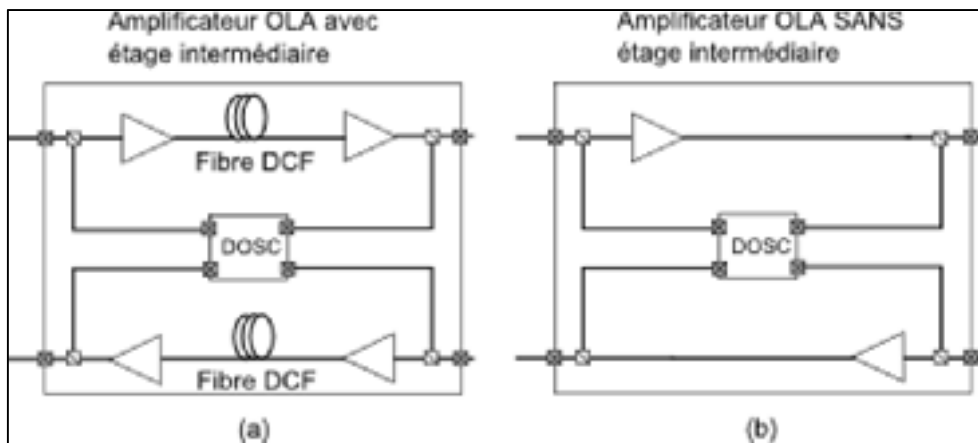


Figure 5.1 Amplificateur de ligne d'une solution optique active (a) et sans filtre (b)

Notez que le DOSC est le composant qui permet de gérer le canal de contrôle, comme il est identique dans les deux architectures de réseaux optique, son étude n'est pas effectuée ici.

5.1.3 Hypothèses sur la commutation

Dans le cas des réseaux optiques actifs, on reprend l'hypothèse stipulant qu'il faut un WSS par port pour chaque nœud disposant d'un degré supérieur à 2 (Archambault, 2010). En revanche, il faut un coupleur par port pour les réseaux optiques sans filtre.

5.2 Définition des règles de coût

Les équations 5.2 et 5.3 définissent les formules de coût qui nous permettront par la suite de calculer à la fois la consommation électrique et les coûts de déploiement des réseaux optiques actifs et des réseaux optiques sans filtre respectivement. Elles se basent à partir des hypothèses et de l'énumération des trois types de composants décrits dans la section 5.1.

$$C_{active} = N_{T-no-eDCM} \cdot C_{T-no-eDCM} + N_{WSS} \cdot C_{WSS} + N_{DS} \cdot C_{DS} \quad (5.2)$$

$$C_{filterless} = N_{T-eDCM} \cdot C_{T-eDCM} + N_{Cou} \cdot C_{Cou} + N_{SS} \cdot C_{SS} \quad (5.3)$$

Le tableau 5.1 résume les définitions des variables utilisées dans les équations (5.2) et (5.3).

Tableau 5.1 Définition des symboles utilisés dans les calculs de coûts et de consommation électrique (5.2) et (5.3)

| Symbole | Signification |
|-----------------|---|
| $N_{T-no-eDCM}$ | Nombre de transpondeurs sans module de compensation électronique de la dispersion pour les réseaux optiques actifs. |
| N_{T-eDCM} | Nombre de transpondeurs avec module de compensation électronique de la dispersion pour les réseaux optiques sans filtre |
| N_{WSS} | Nombre de commutateurs sélectifs en longueur d'onde pour les réseaux optiques actifs |
| N_{Cou} | Nombre de coupleurs (diviseurs ou combineurs) de puissance optique passif pour les réseaux optiques sans filtre |
| N_{DS} | Nombre d'amplificateurs à deux étages pour les réseaux optiques actifs |
| N_{SS} | Nombre d'amplificateurs à un seul étage pour les réseaux optiques sans filtre |

| Symbole | Signification |
|-----------------|--|
| $C_{T-no-eDCM}$ | Coût relié aux transpondeurs avec dispositifs de compensation électronique de la dispersion. |
| C_{T-eDCM} | Coût relié aux transpondeurs sans dispositifs de compensation électronique de la dispersion |
| C_{WSS} | Coût relié aux commutateurs sélectifs en longueur d'onde |
| C_{Cou} | Coût relié aux coupleurs de puissance optique passif |
| C_{DS} | Coût relié aux amplificateurs à deux étages |
| C_{SS} | Coût relié aux amplificateurs à un seul étage |

5.3 Détermination du nombre de connexions à partir duquel un réseau sans filtre possède un coût supérieur à un réseau optique actif

En effectuant la différence des équations (5.2) et (5.3), il est possible de déterminer le nombre de transpondeurs (soit le nombre de connexions) à partir duquel le coût d'une solution optique sans filtre excède celui d'une solution optique active. L'équation (5.4) présente le nombre maximal de connexions en fonction des coûts et nombre de composants précédemment calculés.

$$N_{connexions} < \frac{N_{WSS} \cdot C_{WSS} - N_{Cou} \cdot C_{Cou} + N_{DS} \cdot C_{DS} - N_{SS} \cdot C_{SS}}{C_{T-eDCM} - C_{T-no-eDCM}} \quad (5.4)$$

5.4 Coût des composants

Le tableau 5.2 résume les coûts de chaque composant. Il reprend les valeurs de l'article soumis à ECOC 2012 (Abtahi *et al.*, 2012), ainsi que de Archambault (2009). Les unités sont présentées relativement au coût d'un transpondeur conventionnel à 10 Gbit/s (donc sans module de compensation électronique de la dispersion). En effet, le coût d'un tel transpondeur est bien connu, ainsi que son évolution au fil du temps.

Tableau 5.2 Coût des composants optiques présentés en valeurs relatives par rapport au coût d'un transpondeur conventionnel à 10 Gbit/s

| Composant | | Coût |
|---|---|------|
| Coupleur : C_{Cou} | | 0,02 |
| Amplificateur | A un seul étage : C_{SS} | 1,3 |
| | A deux étages : C_{DS} | 2,6 |
| Commutateur sélectif en longueur d'onde WSS : C_{WSS} | | 2,5 |
| Transpondeur 10 Gbit/s | Avec compensation électronique : C_{T-eDCM} | 1,2 |
| | Sans compensation électronique: $C_{T-no-eDCM}$ | 1 |

5.5 Consommation électrique des composants

Le tableau 5.3 résume la consommation électrique de chaque composant. Il reprend les valeurs de l'article soumis à ECOC 2012 (Abtahi et *al.*, 2012), ainsi que de Archambault (2009).

Tableau 5.3 Consommation électrique de chaque composant. Les valeurs sont relatives à la consommation d'un transpondeur 10 Gbit/s avec module de compensation électronique de la dispersion

| Composant | | Coût |
|---|---|------|
| Coupleur : C_{Cou} | | 0 |
| Amplificateur | A un étage : C_{SS} | 1,3 |
| | A deux étages : C_{DS} | 1,8 |
| Commutateur sélectif en longueur d'onde WSS : C_{WSS} | | 0,9 |
| Transpondeur 10 Gbit/s | Avec compensation électronique : C_{T-eDCM} | 1 |
| | Sans compensation électronique: $C_{T-no-eDCM}$ | 0,9 |

5.6 Étude comparative des coûts et consommation électrique des solutions optiques sans filtre et active en fonction des six réseaux de références

Dans cette section, nous présentons les résultats des coûts et de la consommation électrique des solutions optiques sans filtre et active, pour les réseaux étudiés au chapitre quatre, à savoir :

- le réseau allemand à sept nœuds,
- le réseau italien à dix nœuds,
- le réseau allemand à dix-sept nœuds,
- le réseau européen à huit nœuds,
- le réseau est-américain à onze nœuds,
- et le réseau californien à dix-sept nœuds.

5.6.1 Cas du réseau allemand à sept nœuds

5.6.1.1 Rappel des particularités du réseau

La figure 5.2 est un rappel de la figure 4.4 et présente la topologie du réseau allemand à sept nœuds, et à 22 liens unidirectionnels. En outre, la matrice de trafic a généré 148 demandes de connexion.

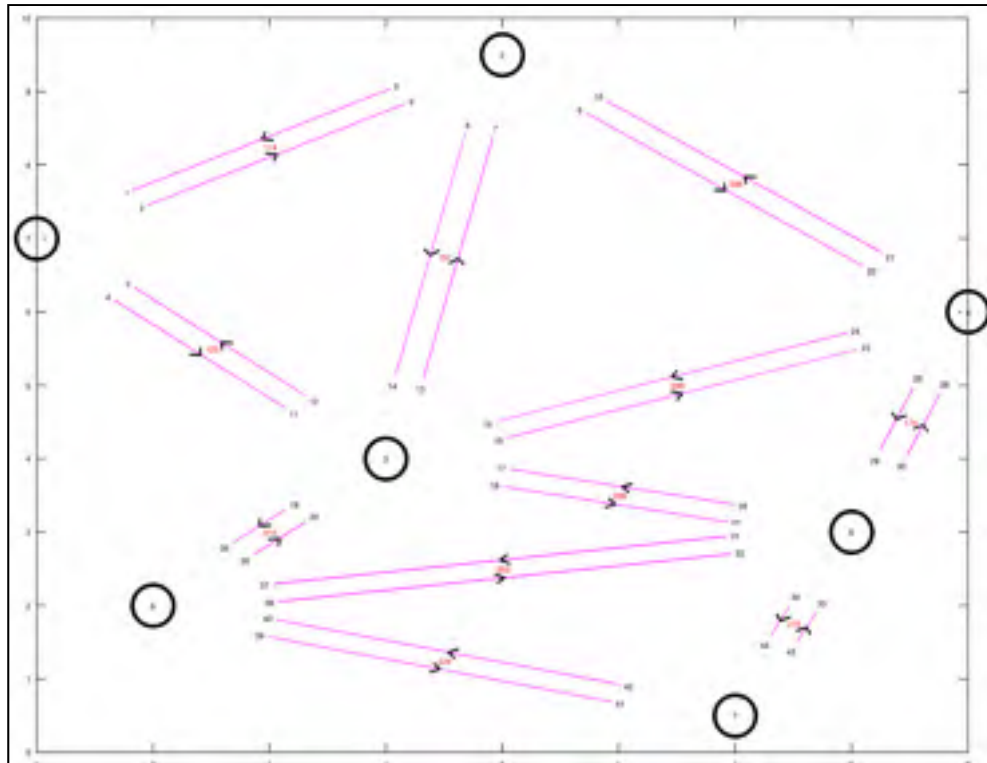


Figure 5.2 Rappel de la topologie du réseau allemand à sept nœuds

Le tableau 5.4 résume le nombre de composants nécessaires de chaque type pour effectuer l'étude des coûts et de la consommation électrique du réseau allemand à sept nœuds.

Tableau 5.4 Nombre de composants requis pour le réseau allemand à sept nœuds et pour 148 demandes de connexion

| Paramètres | Allemand sept nœuds |
|-----------------|---------------------|
| $N_{T-no-eDCM}$ | 148 |
| N_{T-eDCM} | 148 |
| N_{WSS} | 18 |
| N_{Cou} | 22 |
| N_{DS} | 44 |
| N_{SS} | 48 |

A partir du tableau 5.4 et des tableaux 5.2 et 5.3, nous présentons les coûts et la consommation électrique totale dans les sections ci après.

5.6.1.2 Coût du réseau allemand à sept nœuds

Le tableau 5.5 présente les coûts des réseaux optiques actifs et sans filtre, en comparant les coûts de l'amplification, de la commutation du signal, et des transpondeurs. On remarque que la diminution des coûts est très prononcée en ce qui à trait aux réseaux optiques sans filtre. De même, les coûts des amplificateurs sont diminués dans la mesure où dans les réseaux sans filtre, un seul étage est nécessaire par site d'amplification.

Tableau 5.5 Coûts du réseau allemand à sept nœuds pour une solution optique sans filtre et une solution optique active

| Coûts | Allemand sept nœuds | |
|----------------------|---------------------|---------------|
| | Actif | Sans filtre |
| Amplification | 114,4 | 62,4 |
| Commutation | 45 | 0,44 |
| Transpondeur | 148 | 177,6 |
| Total | 307,4 | 240,44 |

Comme on s'y attendait, les transpondeurs sont plus coûteux dans le cas des réseaux optiques sans filtre. Par ailleurs, à l'aide de l'équation (5.4), à partir de 482 demandes de connexion, un réseau optique sans filtre devient plus cher qu'un réseau optique actif pour le réseau allemand à sept nœuds, parce que la hausse induite par les transpondeurs dépasse l'économie effectuée sur l'amplification et la commutation.

De la figure 4.6, on déduit que cela correspond à une charge de trafic élevée, au point que le taux de blocage des requêtes pour les réseaux optiques sans filtre n'est pas négligeable. Donc, on estime que pour un nombre de demandes de connexion n'entraînant pas un taux de

blocage non négligeable, les réseaux optiques sans filtre offrent une bonne réduction du coût des réseaux.

5.6.1.3 Consommation électrique du réseau allemand à sept nœuds

Le tableau 5.6 présente la consommation électrique des réseaux optiques actifs et sans filtre, en comparant les consommations respectives de l'amplification, de la commutation et des transpondeurs. La consommation associée à la commutation est annulée dans le cas des réseaux optiques sans filtre du fait de l'utilisation de diviseurs et de combineurs de puissance optique passif.

Par ailleurs, la part de la consommation électrique économisée des amplificateurs est à peu près perdue par l'usage des transpondeurs pour les réseaux optiques sans filtre. Il advient que, pour cette matrice de trafic et ce réseau particulier, une solution optique sans filtre est à même de proposer une réduction de la consommation électrique de près de 8%.

Tableau 5.6 Consommation électrique du réseau allemand à sept nœuds pour une solution optique sans filtre et une solution optique active

| Coûts | Allemand sept nœuds | |
|----------------------|---------------------|--------------|
| | Actif | Sans filtre |
| Amplification | 79,2 | 62,4 |
| Commutation | 16,2 | 0 |
| Transpondeur | 133,2 | 148 |
| Total | 228,6 | 210,4 |

Enfin, à l'aide de l'équation (5.4), un réseau optique sans filtre devient plus gourmand en termes de consommation électrique qu'un réseau optique actif pour le réseau allemand à sept nœuds, à partir de 330 demandes de connexions, parce que la hausse induite par les transpondeurs surpasse l'économie effectuée sur l'amplification et la commutation.

De la même manière, 330 requêtes correspondent à un taux de blocage non négligeable (cf. figure 4.6) pour les réseaux optiques sans filtre, et donc excèdent la limite en nombre de connexions à partir de laquelle il n'est pas intéressant d'utiliser ces réseaux. Par conséquent, on déduit que pour un nombre de demandes de connexion n'entraînant pas un taux de blocage non négligeable, les réseaux optiques sans filtre offrent une baisse de la consommation électrique.

5.6.2 Cas du réseau italien à dix nœuds

5.6.2.1 Rappel des particularités du réseau

La figure 5.3 est un rappel de la figure 4.7 et présente la topologie du réseau italien à dix nœuds, et à 30 liens unidirectionnels. De plus, la matrice de trafic a généré 90 demandes de connexion.

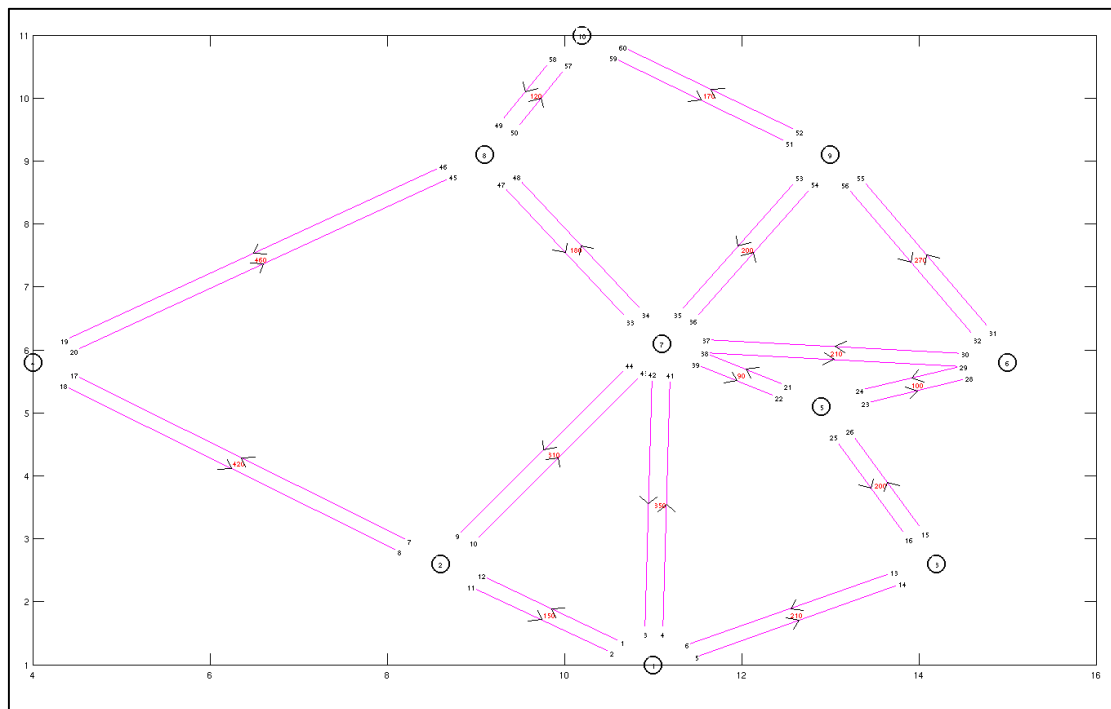


Figure 5.3 Rappel de la topologie du réseau italien à dix nœuds

Le tableau 5.7 résume le nombre de chaque composant nécessaire pour effectuer l'étude des coûts et de la consommation électrique du réseau italien à dix nœuds.

Tableau 5.7 Nombre de composants requis pour le réseau italien à dix nœuds et pour 90 demandes de connexion

| Paramètres | Italien dix nœuds |
|-----------------|-------------------|
| $N_{T-no-EDCM}$ | 90 |
| N_{T-EDCM} | 90 |
| N_{WSS} | 24 |
| N_{Cou} | 30 |
| N_{DS} | 60 |
| N_{SS} | 66 |

5.6.2.2 Coût du réseau italien à dix nœuds

Le tableau 5.8 présente les coûts des réseaux optiques actifs et sans filtre, en comparant les coûts de l'amplification, de la commutation du signal, et des transpondeurs pour le réseau italien à dix nœuds.

Tableau 5.8 Coûts du réseau italien pour les solutions optiques sans filtre et active

| Coûts | Italien dix nœuds | |
|----------------------|-------------------|--------------|
| | Actif | Sans filtre |
| Amplification | 156 | 85,8 |
| Commutation | 60 | 0,6 |
| Transpondeur | 90 | 108 |
| Total | 306 | 194,4 |

L'équation (5.4) nous permet de déduire qu'au-delà de 648 demandes de connexion, un réseau optique sans filtre devient plus cher qu'un réseau optique actif pour le réseau allemand à sept nœuds, parce que la hausse induite par les transpondeurs est encore une fois supérieure à l'économie effectuée sur l'amplification et la commutation.

De la figure 4.8, on déduit que cela correspond à une charge de trafic élevée, au point que le taux de blocage des requêtes pour les réseaux optiques sans filtre n'est pas négligeable. La conclusion est similaire à celle exposée dans la section 5.6.1.2.

5.6.2.3 Consommation électrique du réseau italien à dix nœuds

Le tableau 5.9 présente la consommation électrique des réseaux optiques actifs et sans filtre, en comparant les consommations respectives de l'amplification, de la commutation et des transpondeurs, pour le réseau italien à dix nœuds.

Tableau 5.9 Consommation électrique du réseau italien à dix nœuds pour les solutions optiques sans filtre et active

| Coûts | Italien dix nœuds | |
|----------------------|-------------------|--------------|
| | Actif | Sans filtre |
| Amplification | 108 | 85,8 |
| Commutation | 21,6 | 0 |
| Transpondeur | 81 | 90 |
| Total | 210,6 | 175,8 |

Depuis l'équation (5.4), un réseau optique sans filtre devient plus gourmand en termes de consommation électrique qu'un réseau optique actif pour le réseau italien à dix nœuds, à partir de 438 demandes de connexions.

438 requêtes correspondent à un taux de blocage non négligeable (cf. figure 4.8) pour les réseaux optiques sans filtre. On aboutit aux mêmes conclusions que précédemment, à savoir que dans les conditions d'utilisation d'un réseau optique sans filtre, celui-ci consomme moins qu'un réseau optique actif.

5.6.3 Cas du réseau allemand à dix-sept nœuds

5.6.3.1 Rappel des particularités du réseau

La figure 5.4 est un rappel de la figure 4.9 et présente la topologie du réseau allemand à dix-sept nœuds, et à 52 liens unidirectionnels. De plus, la matrice de trafic a généré 272 demandes de connexion.

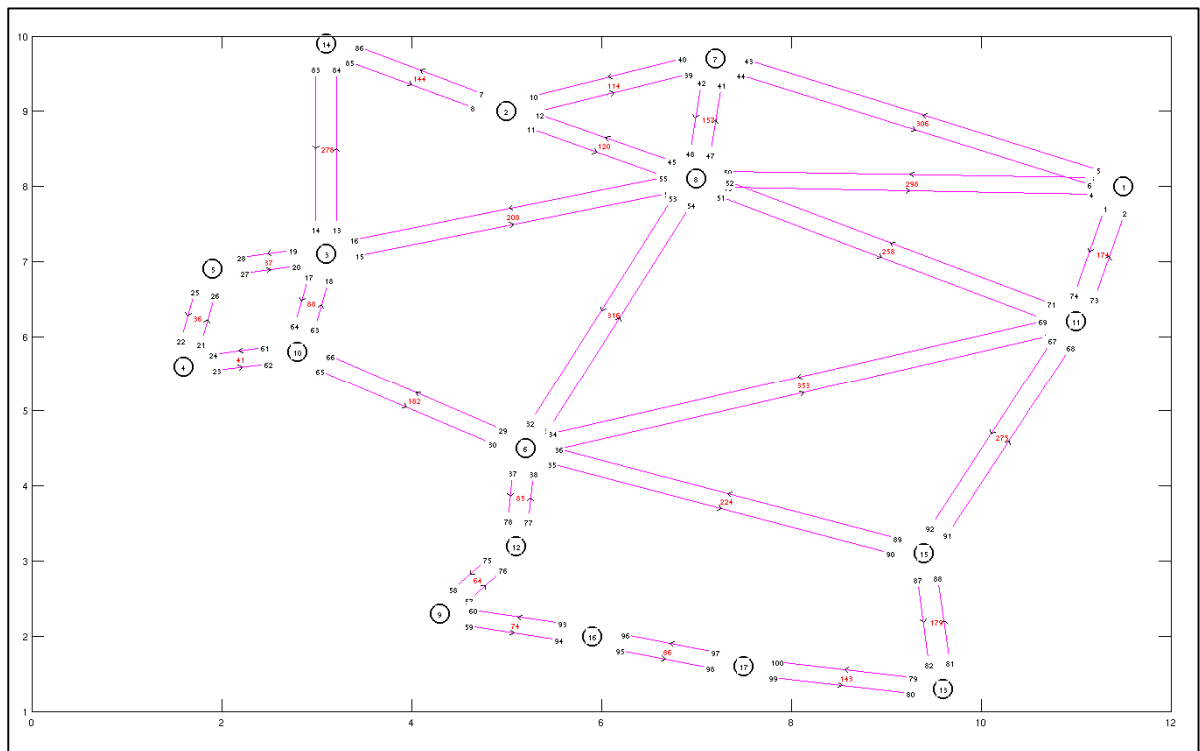


Figure 5.4 Rappel de la topologie du réseau allemand à dix-sept nœuds

Le tableau 5.10 résume le nombre de chaque composant nécessaire pour effectuer l'étude des coûts et de la consommation électrique du réseau italien à dix nœuds.

Tableau 5.10 Nombre de composants requis pour le réseau allemand à dix-sept nœuds et pour 272 demandes de connexions

| Paramètres | Allemand dix-sept nœuds |
|-----------------|-------------------------|
| $N_{T-no-eDCM}$ | 272 |
| N_{T-eDCM} | 272 |
| N_{WSS} | 24 |
| N_{Cou} | 52 |
| N_{DS} | 82 |
| N_{SS} | 96 |

5.6.3.2 Coût du réseau allemand à dix-sept nœuds

Le tableau 5.11 présente les coûts des réseaux optiques actifs et sans filtre, en comparant les coûts de l'amplification, de la commutation du signal, et des transpondeurs pour le réseau allemand à dix-sept nœuds.

Tableau 5.11 Coûts du réseau allemand à dix-sept nœuds pour les solutions optiques sans filtre et active

| Coûts | Allemand dix-sept nœuds | |
|----------------------|-------------------------|---------------|
| | Actif | Sans filtre |
| Amplification | 213,2 | 124,8 |
| Commutation | 95 | 1,04 |
| Transpondeurs | 272 | 326,4 |
| Total | 580,2 | 452,24 |

L'équation (5.4) nous permet de déduire qu'au-delà de 736 demandes de connexion, un réseau optique sans filtre devient plus cher qu'un réseau optique actif pour le réseau allemand à dix-sept nœuds.

De la figure 4.10, on déduit que cela correspond à une charge de trafic élevée, au point que le taux de blocage des requêtes pour les réseaux optiques sans filtre n'est pas négligeable. La conclusion est similaire à celle exposée dans la section 5.6.1.2.

5.6.3.3 Consommation électrique du réseau allemand à dix-sept nœuds

Le tableau 5.9 présente la consommation électrique des réseaux optiques actifs et sans filtre, en comparant les consommations respectives de l'amplification, de la commutation et des transpondeurs, pour le réseau italien à dix nœuds.

Tableau 5.12 Consommation électrique du réseau allemand à dix-sept nœuds pour les solutions optiques sans filtre et actives

| Coûts | Allemand dix sept nœuds | |
|----------------------|-------------------------|--------------|
| | Actif | Sans filtre |
| Amplification | 147,6 | 124,8 |
| Commutation | 34,2 | 0 |
| Transpondeurs | 244,8 | 272 |
| Total | 426,6 | 396,8 |

Depuis l'équation (5.4), un réseau optique sans filtre devient plus gourmand en termes de consommation électrique qu'un réseau optique actif pour le réseau italien à dix nœuds, à partir de 444 demandes de connexions.

444 requêtes correspondent à un taux de blocage non négligeable (cf. figure 4.10) pour les réseaux optiques sans filtre.

5.6.4 Généralisation à un ensemble de réseaux

Le tableau 5.13 résume les résultats présentés dans les sections précédentes pour les réseaux allemand à sept et dix-sept nœuds et italien à dix nœuds. Il présente en outre les résultats pour les réseaux européen à huit nœuds, est américain à onze nœuds et californien à dix sept nœuds. Les résultats, pour ces réseaux, sont obtenus de la même manière que pour les trois premiers réseaux, et correspondent aux matrices de trafic qui ont été utilisées à travers le chapitre quatre. Pour chaque réseau, les nombres de connexions générées sont données dans le tableau 4.12.







Pour toutes les topologies présentées, les réseaux optiques sans filtre présentent une diminution du coût. En revanche, on constate, pour la consommation électrique, que les réseaux est américain à onze nœuds et californien à dix-sept nœuds consomment plus dès qu'il s'agit de réseaux optiques sans filtre.

Ceci est lié au fait que d'une part, les matrices de trafic génèrent un nombre important de demandes de connexions (respectivement 110 et 272), mais aussi par le degré de connectivité. Le réseau californien peut être mis en comparaison avec le réseau allemand à dix-sept nœuds, puisqu'ils ont le même nombre de nœuds et le même nombre de demandes de connexion. Dans le premier cas, on constate 40 liens contre 52 dans le second.

Par conséquent, lorsque la topologie est fortement maillée (degré de connexion moyen élevé, (Archambault, 2009)), alors les réseaux optiques sans filtre consomment moins. En revanche, les réseaux est américain et californien présentent de nombreux nœuds avec un degré de connexion de deux. Dans ces nœuds, aucun WSS n'est utilisé, et donc les économies des réseaux optiques sans filtre ne portent plus que sur l'amplification.

C'est pourquoi on constate pour ces deux derniers réseaux que la consommation électrique est légèrement supérieure pour les réseaux optiques sans filtre par rapport aux réseaux optique à commutation active.

Tableau 5.13 Coût et consommation électrique des solutions optiques sans filtre et actives pour un ensemble de six réseaux

| Réseau | Topologie physique | Coût du réseau | | Consommation électrique | |
|---------------------------------|---|----------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | | Actif | Sans filtre | Actif | Sans filtre |
| Réseau allemand (7 nœuds) |  | 307,4 | 240,44 | 228,6 | 210,4 |
| Réseau italien (10 nœuds) |  | 306 | 194,4 | 210,6 | 175,8 |
| Réseau allemand (17 nœuds) |  | 580,2 | 452,24 | 426,6 | 396,8 |
| Réseau européen (8 nœuds) |  | 301,2 | 175,58 | 205,2 | 163,9 |
| Réseau Est-américain (11 nœuds) |  | 273,2 | 229,98 | 207 | 207,5 |
| Réseau californien (17 nœuds) |  | 423,5 | 406,5 | 333,9 | 351,3 |

5.6.5 Consommation électrique de la couche physique et de la couche IP

Pour conclure, l'un des enjeux de demain dans notre ère post Copenhague consiste dans la définition de réseaux moins gourmands en énergie. Avec l'essor constaté, et décrit au chapitre un, des applications Internet, et la hausse du nombre d'utilisateurs, les réseaux de télécommunications dissipent une part de plus en plus importante de l'énergie produite sur la planète.

Dans cette section, la part de l'énergie produite par la couche optique est mise en comparaison avec celle de la couche réseau. Par exemple, le système de routage de Cisco (CRS) a une consommation électrique telle que décrite à l'équation (5.5) :

$$Puissance_{dissipee_CRS1} = 2.92.N_{Noeuds} + 125.N_{connections} \text{ kW} \quad (5.5)$$






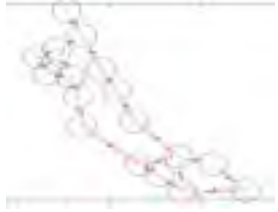
Où N est le nombre de connexions découlant directement de la matrice de trafic, tel qu'évoqué à travers le chapitre cinq. Ceci correspond à la formule décrite dans Idzikowski (2009, p. 6) et ramenée à l'ensemble du réseau. En effet l'équipement CRS-1 en tant que tel consomme 2.92 kW, et à chaque carte 40 Gbit/s ajoutée correspond une hausse de 500 W.

Comme les transpondeurs optiques à l'étude ont un débit de 10 Gbit/s, nous faisons l'hypothèse que chaque connexion du réseau de référence correspond à une carte consommant 125 W au niveau du routeur CRS-1 de Cisco.

De (Ciena, 2011), on déduit que le transpondeur 10 Gbit/s sans module de compensation électronique de la dispersion a une consommation électrique aux alentours de 40W. Or, du tableau 5.3, cette consommation se rapporte à 0.9. On en déduit que l'unité est aux abords de 44W.

Le tableau 5.14 présente ainsi les consommations respectives, en kW, de la couche physique et de la couche réseau.

Tableau 5.14 Consommation électrique des solutions optiques sans filtre et à commutation active par rapport à la consommation équivalente dans la couche réseau

| Réseau | Topologie physique | Consommation électrique (en kW) | | |
|---------------------------------|---|---------------------------------|-------------|---------------|
| | | Couche physique | | Couche réseau |
| | | Commutation active | Sans filtre | |
| Réseau allemand (7 nœuds) |  | 10,06 | 9,26 | 38,94 |
| Réseau italien (10 nœuds) |  | 9,27 | 7,74 | 40,45 |
| Réseau allemand (17 nœuds) |  | 18,77 | 17,46 | 83,64 |
| Réseau européen (8 nœuds) |  | 9,03 | 7,21 | 30,36 |
| Réseau Est-américain (11 nœuds) |  | 9,11 | 9,13 | 45,87 |
| Réseau californien (17 nœuds) |  | 14,69 | 15,46 | 83,64 |

A mesure que le réseau croît en taille et en nombre de connexions, la différence de consommation entre la couche réseau et la couche physique augmente. On en déduit que la part relative de la couche physique est faible comparée à la couche réseau. Et l'on remarque que les réseaux optiques sans filtre, en ce qui concerne du moins les réseaux allemands, italien et européen offrent une réduction de cette consommation, ce qui les rend, de ce point de vue, une solution potentiellement durable.

CONCLUSION

Cette thèse porte sur la définition d'un plan de contrôle pour les réseaux optiques sans filtre. En particulier, un tel plan de contrôle doit intégrer les caractéristiques inédites d'un réseau optique sans filtre, afin de permettre l'échange des informations topologiques et de connectivité du réseau; ce, afin de produire les meilleures routes possibles ainsi que de gérer automatiquement les ressources du plan de données.

Les réseaux optiques sans filtre, de par la présence des diviseurs et combineurs de puissance optique passifs, ne sont pas en mesure d'effectuer le blocage des longueurs d'onde, une fois que celles-ci sont parvenues aux nœuds destinataires, au contraire des réseaux optiques à commutation active. Cette caractéristique introduit une attention accrue ou nouvelle de la part d'un plan de contrôle, en ce qui concerne :

- la formation de boucles lasers ou de chemins multiples produisant des interférences lumineuses;
- l'insertion d'un nouveau nœud ou la modification d'un arbre optique passif pouvant induire l'effondrement immédiat d'une section du réseau;
- la gestion des canaux non filtrés; puisque ceux-ci continuent de se propager dans la structure passive, une fois atteint les nœuds destinataires, ils participent, tout comme les connexions utiles, à la mobilisation de longueurs d'onde, et peuvent accroître le nombre de longueurs d'onde utilisées ainsi que le taux de blocage de nouvelles demandes de connexion;
- enfin la gestion des *trailed light-trees*, où grâce à la passivité interne d'un nœud, il est théoriquement plus aisé d'introduire du signal dans une longueur d'onde donnée à partir d'un nœud intermédiaire. Une longueur d'onde devient ainsi un bus optique.

Nous avons proposé la définition d'un plan de contrôle au sens classique du terme, c'est-à-dire que celui-ci est implémenté à l'aide d'une longueur d'onde dédiée (OSC) pour le contrôle, et qu'il est filtré à chaque nœud. A partir de cette hypothèse, il nous est possible d'envisager un plan de contrôle qui se comporte identiquement à celui issu de l'état de l'art.

Toutefois, pour intégrer les caractéristiques propres aux réseaux sans filtre, nous proposons l'introduction des PCE, composants génériques qui, à partir d'une vue du réseau, et moyennant des algorithmes de routage et des contraintes qui lui sont spécifiées, est à même de produire le routage pour une demande de connexion donnée, et compte tenu de l'état des connexions préalablement établies.

Dès lors, nous avons défini nos propres algorithmes de routage, d'assignation de longueur d'onde et de validation physique en vue de la définition de ces PCE. La proposition est basée sur une stratégie :

- d'équilibrage de charge (*load balancing*) entre les arbres pour le routage;
- et de choix de la première longueur d'onde disponible (*first fit*) pour l'assignation de la longueur d'onde.

Nous aboutissons ainsi à la proposition d'un plan de contrôle centralisé, basé sur deux PCE coopérant, le premier ayant pour fonction de sélectionner un arbre optique passif optimal pour une demande de connexion donnée, le second ayant pour mandat de s'assurer que la connexion proposée sur l'arbre en question sera établie en minimisant le taux d'erreurs de transmission.

Un simulateur de plan de contrôle a été créé à partir du langage de programmation java. Celui-ci implémente un tel plan de contrôle, et permet la validation des concepts proposés. Testé à un ensemble de six réseaux de référence de sept à dix-sept nœuds pour des matrices de trafic générant de 56 à 272 demandes de connexion, le simulateur offre des performances correctes par rapport aux résultats obtenus de travaux antérieurs basés sur des algorithmes de routage statique optimaux, en termes de :

- nombre de longueurs d'onde utilisées,
- taux de blocage,
- mais aussi en termes de nombre de canaux non filtrés.

Nous constatons qu'il est possible de sélectionner une solution sans filtre parmi celles issues de l'outil de design sans filtre, la meilleure selon les critères définis ci-dessus. Nous avons constaté en outre que les réseaux optiques semblent mieux performer dans les conditions suivantes :

- pour des réseaux fortement maillés, c'est-à-dire que le degré de connectivité interne moyen doit être élevé;
- pour des réseaux possédant le plus d'arbres de longue distance possible, de façon à toujours laisser le choix de plus d'un arbre à un PCE, et donc de diminuer à la fois taux de blocage et longueurs d'onde utilisées.

Par ailleurs, nous avons proposé des mécanismes en vue d'empêcher les réseaux optiques sans filtre de s'effondrer dans le cas où une erreur humaine viendrait à mal configurer les interconnexions d'un nœud et produirait ainsi une boucle laser. Cette procédure fait appel au plan de contrôle pour la détection, par exemple, d'une boucle fermée, dans sa vue du réseau, et force l'être humain à suivre une méthodologie particulière d'attente de validation avant de terminer la connexion complète de son nœud. Ceci lui garantit, lors du placement d'un nouveau nœud dans une topologie, que celui-ci est correctement configuré.

Enfin la thèse s'attache à démontrer que les réseaux optiques sans filtre sont particulièrement efficaces en termes de coût et de consommation électrique. De la même manière que pour la validation du plan de contrôle, nous parvenons à la conclusion que ces réseaux performant particulièrement dans un contexte de topologie fortement maillée.

Cette thèse a permis de développer des articles et des présentations à des conférences parmi lesquelles :

Mantelet, G., Tremblay, C., Plant, D. V., P. Littlewood, Bélanger, M. P. 2012. *PCE-based centralized control plane for filterless networks*, soumis à IEEE Journal of Communications.

Mantelet, G et Cassidy, A. Tremblay, C., Plant, D. V., Littlewood, P., Bélanger, M. P. 2012. *Proposed optical control plane concepts for filterless optical networks*. Montreal : Proc. 14th Photonics North Conference

Tremblay, C. Mantelet, G.; Bélanger, M. P.; Plant, D. V. 2010. *Filterless networks for emerging applications: a comparison analysis with optical switching and light-trail networks*, Montreal : Proc. 10th INFORMS Telecommunications Conference, 2 p.

Ces articles et présentations de conférence portent sur la définition des concepts du plan de contrôle optique sans filtre, ainsi que des résultats issus du simulateur de plan de contrôle dont le but était de valider les concepts présentés.

Par ailleurs, le volet concernant l'étude des coûts et consommation électrique des réseaux optiques sans filtre a permis l'élaboration de présentations sur les réseaux de communication éco-énergétique :

Abtahi, F., Cavdar, C., Chen, J., Khanmohamadi, S., Wosinska, L., Mantelet, G., Archambault, É., Tremblay, C., Bélanger, M. P. 2012. *Optimal design of cost- and energy-efficient scalable passive optical backbone networks*, IEEE/OSA/SPIE Asia Communications and Photonics (ACP'12) Conf., Guangzhou, China, November 7-10, 2012, Paper AS3D.4.

Mantelet, G.; Tremblay, C. 2011. *Filterless optical networks: an energy-efficient solution*, Montréal : Entretiens Jacques Cartier : Workshop "Are Communication and Information Technologies Green?"

RECOMMANDATIONS

Trois axes nous semblent aussi dignes d'intérêt pour des explorations futures en vue d'améliorer l'efficacité de ces réseaux :

- l'exploration du concept de réseau semi sans filtre, en ce qui concerne le plan de contrôle. En effet, nous nous attendons à ce que les gains de performance proposées (Khanmohamadi et *al.*, 2011) soient répercutés sur le système proposé dans cette thèse;
- dans un même ordre d'idée, l'exploitation du concept d'indépendance à la grille ITU permet une gestion plus fine et optimale du spectre fréquentiel supporté par la fibre optique. De là, il est possible de réitérer les succès commerciaux de plates-formes métropolitaines qui seraient capables de traiter indifféremment tout type de protocole et de format de modulation tributaire, et ce, simplement;
- enfin la passivité de ces architectures offre une plus grande facilité avec laquelle on peut ajouter du contenu dans les nœuds intermédiaires ce qui peut accroître leur flexibilité par rapport aux réseaux optiques actifs. De là à ce que les besoins deviennent de moins en moins *unicast*, nous pourrions ainsi y percevoir un intérêt indéniable.

ANNEXE I

UNE MESURE DE LA CAPACITÉ MAXIMALE THÉORIQUE D'UN CANAL

La limite de Shannon-Hartley adaptée aux réseaux optiques transparents, tenant compte des densités spectrales du signal (R) et du bruit (K) incluant les bruits des amplificateurs et des effets non linéaires (Tang, 2007), et d'une information binaire (1 et 0), vaut :

$$C \approx B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{R(\omega_0)}{K(\omega_0)} \right) \quad (\text{A I-1})$$

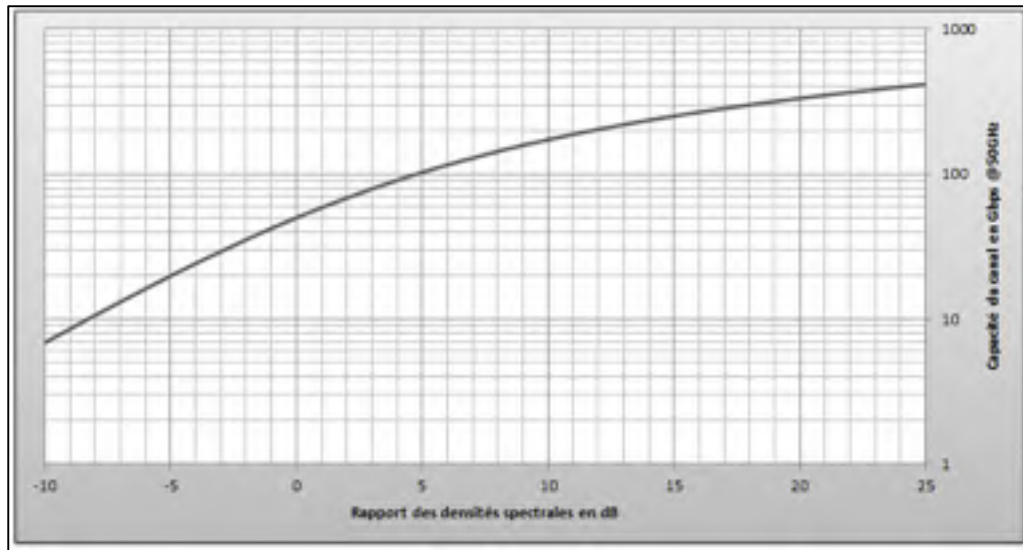


Figure-A I-1 Capacité maximale du canal en fonction du bruit du medium

La densité spectrale de bruit des amplificateurs EDFA utilisée vaut :

$$N \cdot Q(\omega_0) = N \cdot 10^{\frac{NF}{10}} \ln(G - 1) \quad (\text{A I-2})$$

De l'équation (A I-1), en utilisant l'équation (A I-2) :

$$K(\omega_0) = N \cdot Q(\omega_0) + 2N \left(\frac{\gamma}{2\pi} \frac{N_c \omega_c}{\alpha^2} \right)^2 \left(\frac{P}{\omega_c} \right)^3 \vartheta + N(N-1) \left(\frac{\gamma}{2\pi} \frac{N_c \omega_c}{\alpha^2} \right)^2 \left(\frac{P}{\omega_c} \right) Q^2(\omega_0) \vartheta \quad (\text{A I-3})$$

Avec ϑ représentant une intégration sur tous les canaux optiques DWDM des effets Kerr, est estimée à partir de Tang (2007) :

$$g = 6.8 \left(\frac{\beta (N_c \omega_c)^2}{\alpha} \right)^{-0.827}$$

(A I-4)

Le tableau suivant résume les valeurs utilisées dans cette thèse :

Tableau-A I-1 : Valeur typique d'une communication DWDM sur une fibre optique

| Paramètres | Valeurs |
|------------|--|
| α | 0,048 km ⁻¹ |
| β | -20 ps ² .km ⁻¹ |
| γ | 1,22 W ⁻¹ .km ⁻¹ |
| Nc | 80 |
| ω_c | 100 GHz |
| NF | 5 dB |
| G | 20,8 dB |

On peut tracer la capacité d’un canal en fonction de sa puissance d’émission et estimer les impacts des effets non linéaires sur son débit maximal similaire (Tang, 2007) :

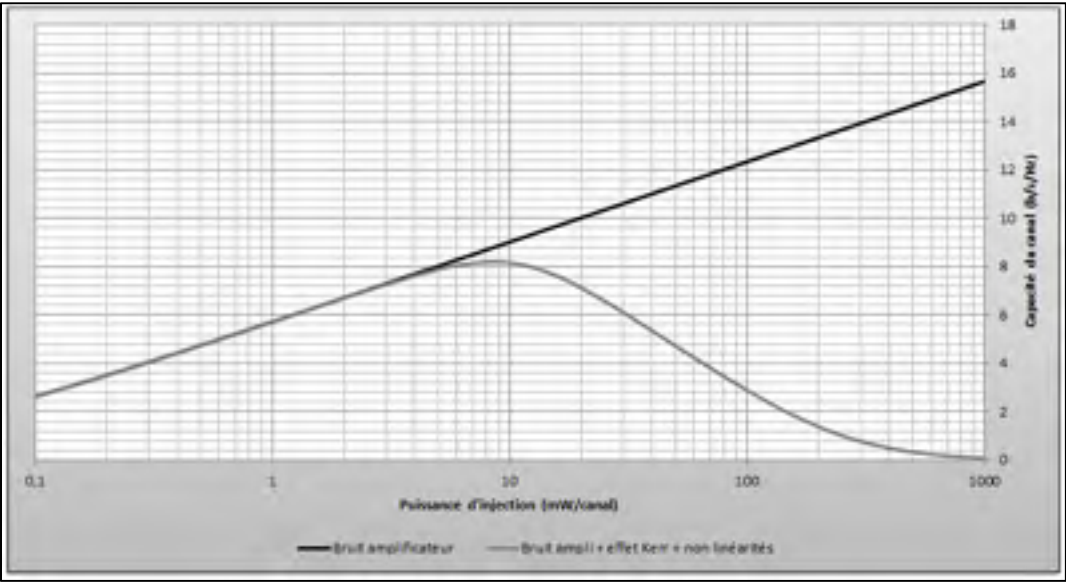


Figure-A I-2 Capacité d'un canal en fonction de sa puissance d'injection

On peut ramener l’équation (A I-1) à une fonction donnant la capacité maximale d’un canal en fonction du nombre d’amplificateurs :

$$C = B \cdot \log_2(1 + K \cdot N^{-1}) \quad (\text{A I-5})$$

Avec une constante calculée $K = 2^{10}$, de 3dB inférieure à la valeur trouvée dans Tang (2007), la capacité se ramène dès lors à des conditions dans notre document différentes de celle de l'article.

On en déduit la portée théorique maximale (en nombre d'amplificateurs, cf. figure-A I-3) en fonction du débit souhaité :

$$N = \frac{K}{e^{\frac{C}{B} \ln(2)} - 1} = \frac{2^{10}}{e^{\frac{C}{B} \ln(2)} - 1} \quad (\text{A I-6})$$

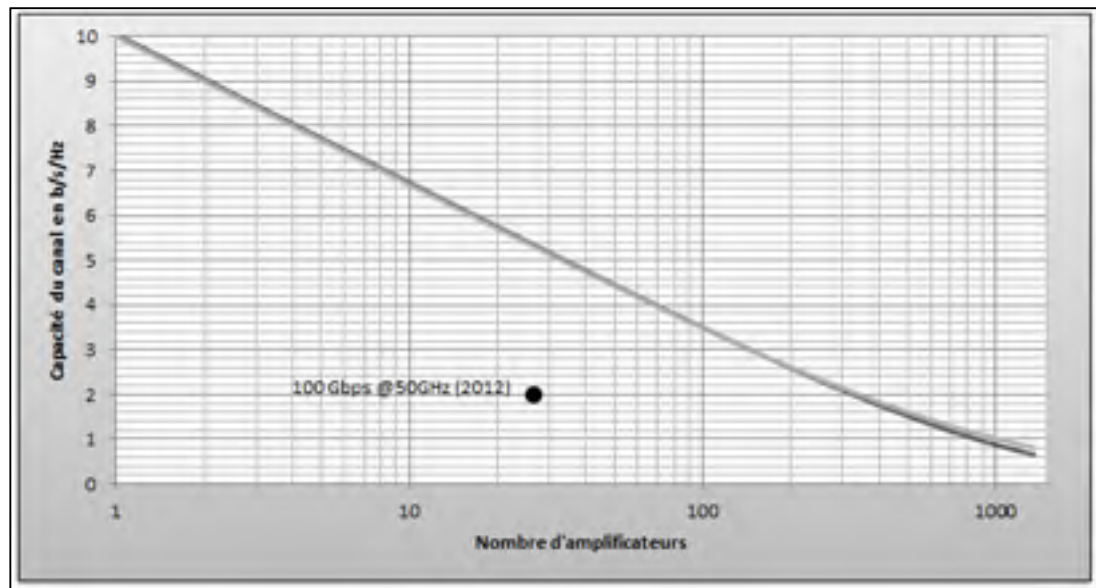


Figure-A I-3 Capacité maximale d'un canal en fonction du nombre de sections

ANNEXE II

ALGORITHMES DU PLAN DE CONTRÔLE

Cet algorithme procède à la recherche d'un chemin

```
package network.control;

/**
 * This class is the Path Computation Solver
 *
 * It needs to call the Traffic Engineering Database Interface so as
to collect relevant data for path computation
 *
 * @author Guillaume Mantelet <guillaume_mantelet@hotmail.com>
 * @version 2.1
 * @since 1.6
 * @see TrafficEngineeringDatabaseInterface
 */

import java.util.Collections;
import java.util.HashMap;
import java.util.HashSet;
import java.util.Iterator;
import java.util.LinkedList;
import java.util.List;
import java.util.Map;
import java.util.Set;
import java.util.TreeMap;
import java.util.TreeSet;

public class PCS {

    /**
     * Pointer of the TED Interface
     */
    private TrafficEngineeringDatabaseInterface tedi;

    /**
     * Constructor of the PCS
     *
     * @param tedi you need to attach a pointer toward the TED
Interface
     */
    public PCS(TrafficEngineeringDatabaseInterface tedi){
```

```

        this.tedi = tedi;
    }

    /**
     * Filterless tree route computer
     *
     * Given an output port, it builds a complete topology in a
     hop by hop fashion. It ends when end port forces TEDI to return
     null.
     *
     * @param emittingPort an output port
     * @return set of the input ports that can be accessed via
     this output port
     * @see
     TrafficEngineeringDatabaseInterface#getRemotePortOfEmittingPort(String)
     * @see
     TrafficEngineeringDatabaseInterface#getEmittingPortsOfJumpers(String)
     */
    public Set<String> giveDestPortsTo(String emittingPort){
        Set<String> receivingPorts = new TreeSet<String>();
        //Collecting the receiving port of this link
        String receivingPort =
        tedi.getRemotePortOfEmittingPort(emittingPort);
        receivingPorts.add(receivingPort);
        //For this receiving port, collecting all the output
        ports connected via jumpers and fetch a for each loop
        if(receivingPort != null)
            for (String s :
        tedi.getEmittingPortsOfJumpers(receivingPort)){
                receivingPorts.addAll(giveDestPortsTo(s));
            }
        return receivingPorts;
    }

    public Map<Integer, List<String>> initDfs(String
    emittingPort){
        List<String> settled = new LinkedList<String>();
        List<String> current = new LinkedList<String>();
        Map<Integer, List<String>> map = new HashMap<Integer,
        List<String>>();

        getAccessiblePathsFrom(emittingPort, settled, current,
        map);

        return map;
    }

    private void getAccessiblePathsFrom(String from, List<String>
    settled, List<String> current, Map<Integer, List<String>> map){

```

```

        settled.add(from);
        settled.add(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));

        Set<String> buf =
tedi.getEmittingPortsOfJumpers(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from)
));
        buf.removeAll(settled);

        if(buf.isEmpty()){

            current.add(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));
            map.put(map.size(), new
LinkedList<String>(current));

            current.remove(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));
        }
        else{

            current.add(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));
            map.put(map.size(), new
LinkedList<String>(current));

            current.remove(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));
        }
        for(String s : buf){
            if (!settled.contains(s)){

                current.add(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));
                current.add(s);
                getAccessiblePathsFrom(s, settled, current,
map);
                current.remove(s);

                current.remove(tedi.getRemotePortOfEmittingPort(from));
            }
        }
    }

    public List<String> getPortsPath(String emittingPort, String
remoteInterface){
        List<String> list = new LinkedList<String>();
        Map<Integer, List<String>> map = initDfs(emittingPort);
        try{
            for (Map.Entry<Integer, List<String>> entry :
map.entrySet())
                if(((LinkedList<String>)
entry.getValue()).getLast().equals(remoteInterface)){
                    list = entry.getValue();

```

```

        ((LinkedList<String>)
list).addFirst(emittingPort);
    }
    }catch(NullPointerException e){
        return list;
    }
    return list;
}

public Double computeLinkMetrics(List<String> portsPath){
    //System.out.println(portsPath);
    String emitting, receiving;
    double counter = 0.0;
    if(portsPath.isEmpty())
        return Double.POSITIVE_INFINITY;
    if(portsPath.size()%2 == 0){
        while(!portsPath.isEmpty()){
            emitting = ((LinkedList<String>)
portsPath).removeFirst();
            //System.out.println("Transmitter : " +
emitting);
            receiving = ((LinkedList<String>)
portsPath).removeFirst();
            //System.out.println("Receiver : " +
receiving);

            //Looking for the corresponding link
            for(Iterator<database.logical.Link> iterator =
tedi.getTed().getLinks().iterator(); iterator.hasNext();){
                database.logical.Link link =
iterator.next();

                if(link.getTransmitter().getId().equals(emitting) &&
link.getReceiver().getId().equals(receiving)){
                    link.getDistance();
                    counter += link.getDistance();
                }
            }
        }
    }
    return counter;
}

/**
 * Filterless tree route reverse computer
 *
 * Given an input port, it goes upward to build a complete
topology in a hop by hop manner. It ends when convener port forces
TEDI to return null
 *

```

```

        * @param receivingPort an input port
        * @return set of all the output ports that can call this
input port
        * @see
TrafficEngineeringDatabaseInterface#getRemotePortOfReceivingPort(String)
        * @see
TrafficEngineeringDatabaseInterface#getReceivingPortsOfJumpers(String)
        */
        public Set<String> giveAccessingPortsTo(String receivingPort){
            Set<String> emittingPorts = new TreeSet<String>();
            //Collecting the emitting port of this link
            String emittingPort =
tedi.getRemotePortOfReceivingPort(receivingPort);
            emittingPorts.add(emittingPort);
            //For this emitting port, collecting all the input ports
            connected via jumpers and fetch a for each loop
            if(emittingPort != null &&
tedi.getReceivingPortsOfJumpers(emittingPort) != null)
                for (String s :
tedi.getReceivingPortsOfJumpers(emittingPort)){
                    emittingPorts.addAll(giveAccessingPortsTo(s));
                }
            return emittingPorts;
        }

/**
 * Counts the number of downward nodes that can be accessed
for a given node
 *
 * @param emittingNode the node we want to test
 * @return number of accessible nodes for emittingNode
 */
        public Integer
getNumberOfAccessibleNodes(database.logical.Node emittingNode){
            List<database.logical.Port> ports =
emittingNode.getPorts();
            Set<String> temp = new TreeSet<String>();
            Set<String> test = new HashSet<String>();

            for(Iterator<database.logical.Port> iterator =
ports.iterator(); iterator.hasNext();){
                database.logical.Port emittingPort =
iterator.next();
                test = giveDestPortsTo(emittingPort.getId());
                for(String s : test){
                    //WARNING : TREESET DOES NOT ACCEPT NULL
ELEMENTS...
                    if(s != null)

```

```

        temp.add(tedi.getNodeOfPort(s).getName());
    }
    }
    return temp.size();
}

/**
 * Counts the number of accessible interfaces that can be
accessed for a given node
 *
 * Note that this number could be greater than the number of
accessible nodes. It is due to the fact that a node can be accessed
via multiple passive filterless trees.
 *
 * @param emittingNode the node we want to test
 * @return number of accessible interfaces for emittingNode
 */
public Integer
getNumberOfAccessiblePorts(database.logical.Node emittingNode){
    List<database.logical.Port> ports =
emittingNode.getPorts();
    Set<String> temp = new TreeSet<String>();
    Set<String> test = new HashSet<String>();

    for(Iterator<database.logical.Port> iterator =
ports.iterator(); iterator.hasNext();){
        database.logical.Port emittingPort =
iterator.next();
        test = giveDestPortsTo(emittingPort.getId());
        for(String s : test){
            //WARNING : TREESSET DOES NOT ACCEPT NULL
ELEMENTS...
            if(s != null)
                temp.add(s);
        }
    }
    return temp.size();
}

/**
 * Counts the number of upward nodes that can access this node
 *
 * @param receivingNode the node we want to test
 * @return number of accessing nodes for emittingNode
 */
public Integer getNumberOfAccessingNodes(database.logical.Node
receivingNode){
    List<database.logical.Port> ports =
receivingNode.getPorts();

```

```

        Set<String> temp = new TreeSet<String>();
        Set<String> test = new HashSet<String>();

        for(Iterator<database.logical.Port> iterator =
ports.iterator(); iterator.hasNext();) {
            database.logical.Port receivingPort =
iterator.next();
            test = giveAccessingPortsTo(receivingPort.getId());
            for(String s : test) {
                //WARNING : TREESSET DOES NOT ACCEPT NULL
ELEMENTS...
                if(s != null)

                    temp.add(tedi.getNodeOfPort(s).getName());
            }
        }
        return temp.size();
    }

    /**
     * Counts the number of upward interfaces that can a given
node
     *
     * Note that this number could be greater than the number of
accessing nodes. It is due to the fact that a node is able to access
another one via multiple passive filterless trees.
     *
     * @param receivingNode the node we want to test
     * @return number of accessing interfaces for emittingNode
     */
    public Integer getNumberOfAccessingPorts(database.logical.Node
receivingNode) {
        List<database.logical.Port> ports =
receivingNode.getPorts();
        Set<String> temp = new TreeSet<String>();
        Set<String> test = new HashSet<String>();

        for(Iterator<database.logical.Port> iterator =
ports.iterator(); iterator.hasNext();) {
            database.logical.Port receivingPort =
iterator.next();
            test = giveAccessingPortsTo(receivingPort.getId());
            for(String s : test) {
                //WARNING : TREESSET DOES NOT ACCEPT NULL
ELEMENTS...
                if(s != null)
                    temp.add(s);
            }
        }
        return temp.size();
    }

```



```

        if (receivingPort.getType() ==
database.logical.PortType.END || receivingPort.getType() ==
database.logical.PortType.RECEIVER)

        receivingPorts.add(receivingPort.getId());
    }
}

int cpt = 0;
for(Iterator<List<String>> iterator = paths.iterator();
iterator.hasNext();) {
    List<String> it = iterator.next();
    emittingPorts.add(((LinkedList<String>)
it).getFirst());
    cpt++;
}

Set<String> goodEmittingPorts = new TreeSet<String>();
for(String s : emittingPorts) {
    if(Collections.frequency(emittingPorts, s) ==
receivingNodes.size())
        goodEmittingPorts.add(s);
}

//Collecting metrics
List<Double> metrics = new LinkedList<Double>();
Map<Double, String> emittingCandidate = new
TreeMap<Double, String>();
for(String s : goodEmittingPorts) {
    for(String ss : receivingPorts)

metrics.add(computeLinkMetrics(getPortsPath(s, ss)));
    emittingCandidate.put(Collections.max(metrics,
s);
}

//Collecting the first emitting Port in the map
List<Double> stack = new LinkedList<Double>();
stack.addAll(emittingCandidate.keySet());

if(!stack.isEmpty()) {
    String theChosenOne =
emittingCandidate.get(((LinkedList<Double>) stack).getFirst());
    paths.clear();

    for(String s : receivingPorts)

if (computeLinkMetrics(getPortsPath(theChosenOne,
s)) != Double.POSITIVE_INFINITY)

```

```

        paths.add(getPortsPath(theChosenOne,
s));
        return paths;
    }
    else return null;
}

    public List<String> expandTrail(List<String>
newEmittingNodes, List<String> newReceivingNodes,
database.logical.FilterlessLightPath existingPath){
    //First step : for each emitting node of the path,
collect all the competing node
    List<String> emittingPorts =
existingPath.getEmittingPorts();
    Set<String> competingPorts = new TreeSet<String>();
    for(String s : emittingPorts)
        competingPorts.addAll(giveConcurrentPorts(s));
    //System.out.println("1/ Competing ports : " +
competingPorts);

    //Second step : for each emitting port of the new nodes,
keep only competing ones
    Set<String> newEmittingPorts = new TreeSet<String>();
    for(String s : newEmittingNodes){
        List<database.logical.Port> ports =
tedi.getNode(s).getPorts();
        for(Iterator<database.logical.Port> iterator =
ports.iterator(); iterator.hasNext();){
            database.logical.Port port = iterator.next();
            if(port.getType() ==
database.logical.PortType.CONVENER || port.getType() ==
database.logical.PortType.TRANSMITTER)

if(competingPorts.contains(port.getId()))

newEmittingPorts.add(port.getId());
        }
    }
    //System.out.println("2/ New emitting ports : " +
newEmittingPorts);

    //Third step : for each emitting node of the path,
collect all the accessible nodes
    Set<String> accessiblePorts = new TreeSet<String>();
    for(String s : emittingPorts)
        accessiblePorts.addAll(this.giveDestPortsTo(s));
    //System.out.println("3/ Accessible ports : " +
accessiblePorts);

```

```

        //Fourth step : for each receiving port of the new nodes,
keep only accessible ones
        Set<String> newReceivingPorts = new TreeSet<String>();
        for(String s : newReceivingNodes){
            List<database.logical.Port> ports =
tedi.getNode(s).getPorts();
            for(Iterator<database.logical.Port> iterator =
ports.iterator(); iterator.hasNext();){
                database.logical.Port port = iterator.next();
                if(port.getType() ==
database.logical.PortType.END || port.getType() ==
database.logical.PortType.RECEIVER)

if(accessiblePorts.contains(port.getId()))

newReceivingPorts.add(port.getId());
            }
        }
        //System.out.println("4/ New Receiving ports : " +
newReceivingPorts);

        //Fifth step : adding existing receiving ports and
remove emitting (competing) ports that do not have these receiving
ports as accessible ones

newReceivingPorts.addAll(existingPath.getReceivingPorts());
        Set<String> finalEmitters = new TreeSet<String>();
        for(String s : newEmittingPorts)

if(giveDestPortsTo(s).containsAll(newReceivingPorts))
            finalEmitters.add(s);

newReceivingPorts.removeAll(existingPath.getReceivingPorts());
        //System.out.println("5/ Filtered emitting ports : " +
finalEmitters);

        List<String> finalList = new
LinkedList<String>(finalEmitters);
        finalList.addAll(newReceivingPorts);
        return finalList;
    }
}

```

Algorithme qui permet de retenir la meilleure longueur d'onde

```
package network.control;

import java.util.Collections;
import java.util.Iterator;
import java.util.LinkedList;
import java.util.List;
import java.util.Map;
import java.util.Set;
import java.util.TreeSet;

public class WACS {

    private network.control.TrafficEngineeringDatabaseInterface
tedi;
    private PCS pcs;

    public
WACS(network.control.TrafficEngineeringDatabaseInterface tedi, PCS
pcs){

        this.tedi = tedi;
        this.pcs = pcs;
    }

    public Set<Double> giveLambdasForConcurrentPorts(String
emittingPort){
        Set<Double> set = new TreeSet<Double>();
        try{//FOR XML

            for(String s : pcs.giveConcurrentPorts(emittingPort))
                for (Iterator<database.logical.Transponder>
iterator = tedi.getPort(s).getTransponders().iterator();
iterator.hasNext();) {
                    database.logical.Transponder transp =
iterator.next();
                    set.add(transp.getLambda());
                }
        }
        catch(Exception e){System.out.println("ERROR ! WACS :
giveLambdasForConcurrentPorts...");}
        return set;
    }

    public Integer giveMaximumLambdasPermitted(String
emittingPort){
        List<Integer> list = new LinkedList<Integer>();
        for(String s : pcs.giveConcurrentPorts(emittingPort)){
            for(Iterator<database.logical.Link> iterator =
tedi.getTed().getLinks().iterator(); iterator.hasNext();) {
```

```

        database.logical.Link link = iterator.next();
        if(link.getTransmitter().getId().equals(s))
            list.add(link.getLINK_MAX());
    }
}

try{//FOR XML
    return Collections.min(list);
}
catch(Exception e){
    System.out.println("ERROR ! WACS :
giveMaximumLambdasPermitted...");
    return null;
}
}

public Set<Double> discoverJunkLambdasFor(String
emittingPort){
    Set<Double> activeWavelength = new TreeSet<Double>();
    //Add the active lambdas ot this port

    activeWavelength.addAll(tedi.giveListOfLambdaFor(emittingPort)
);
    //Get the active lambdas of every accessing ports to the
receiving ports corresponding to this one via jumpers
    for(String s :
tedi.getReceivingPortsOfJumpers(emittingPort))
        for(String ss : pcs.giveAccessingPortsTo(s))

        activeWavelength.addAll(tedi.giveListOfLambdaFor(ss));
    //Then we remove all the active wavelength of the
downward accessible receiving ports
    for(String s : pcs.giveDestPortsTo(emittingPort))

    activeWavelength.removeAll(tedi.giveListOfLambdaFor(s));
    return activeWavelength;
}

public Double giveLambda(int index, double CHANNELSPACING){
    return 1530.0 + index*CHANNELSPACING;
}

public Set<Double> generateITUGrid(double CHANNELSPACING, int
NUM_CHANNEL){
    Set<Double> grid = new TreeSet<Double>();
    for (int i=0; i<NUM_CHANNEL; i++)
        grid.add(1530.0 + CHANNELSPACING*i);
    return grid;
}

```

```

/**
 * This method seeks amongst paths a best one, that is the
 * proposed path with minimum latency that has not a full link.
 *
 * @param KPath
 * @return
 */
public List<String> getBestP2PCandidateFor(Map<Double,
List<String>> KPath){
    for(Map.Entry<Double, List<String>> entry :
KPath.entrySet()){
        LinkedList<String> list = (LinkedList<String>)
entry.getValue();

        if(this.giveMaximumLambdasPermitted(list.getFirst())>0)
            return list;
    }
    return null;
}

/**
 * For a chosen path, returns the best wavelength, according
 * to a first-fit strategy. (TO BE IMPROVED !!!)
 *
 * @param bestPath
 * @return
 */
public Double giveBestP2PLambdaFor(List<String> bestPath,
double CHANNELSPACING, int NUM_CHANNEL){
    if(bestPath != null){
        Set<Double> usedLambdas =
giveLambdasForConcurrentPorts(((LinkedList<String>)
bestPath).getFirst());
        Set<Double> ITUGrid =
generateITUGrid(CHANNELSPACING, NUM_CHANNEL);
        ITUGrid.removeAll(usedLambdas);

        //Moving from set to list
        List<Double> stack = new LinkedList<Double>();
        stack.addAll(ITUGrid);

        //VERSION 2.4, REMOVE IF IT BUGS !!!
        if(!stack.isEmpty())
            return ((LinkedList<Double>)
stack).getFirst();
        //else
        //System.out.println("WARNING : No more
available lambda on ITU grid");
    }
    return null;
}

```

```

    }

    public Double giveBestP2MPLambdaFor(Set<List<String>> paths,
double CHANNELSPACING, int NUM_CHANNEL){
        if(paths != null){
            Set<Double> usedLambdas = new TreeSet<Double>();
            for(Iterator<List<String>> iterator =
paths.iterator(); iterator.hasNext();)

                usedLambdas.addAll(giveLambdasForConcurrentPorts(((LinkedList<
String>) iterator.next()).getFirst()));
                Set<Double> ITUGrid =
generateITUGrid(CHANNELSPACING, NUM_CHANNEL);
                ITUGrid.removeAll(usedLambdas);

                //Moving from set to list
                List<Double> stack = new LinkedList<Double>();
                stack.addAll(ITUGrid);

                return ((LinkedList<Double>) stack).getFirst();
            }
        }
        return null;
    }

    public double giveLambdaForThisChannel(Integer channel){
        return 1530.0 + (channel - 1)*0.8;
    }
}

```

Algorithme qui gère la validation physique des connexions demandées

```

package network.control;

import java.util.HashMap;
import java.util.Iterator;
import java.util.LinkedList;
import java.util.List;
import java.util.Map;
import java.util.NoSuchElementException;
import java.util.Set;
import java.util.TreeSet;

public class IACS {

    private network.control.PhysicalParameterDatabaseInterface
ppdi;
    private database.physical.QoTPolicy QoTPolicy;

    private final double h = 6.6256e-34;//Planck J.S or W.s2

```



```

        private final double c = 3e8;//Light celerity m.s-1
        private final double R = 0.85;//Responsivity
        private final double q = 1.6023e-19;//in Coulombs
        private final double Bo = 12.5e9;//Amplifier optical bandwidth
        private final double Be = 6e9;//Receiver electrical bandwidth
        private final double CA = 0.008;//Jean Philippe Savoie's
        penalty according to Hui and O'Sullivan Q equation
        private final double CB = 0.007;//Jean Philippe Savoie's
        penalty according to Hui and O'Sullivan Q equation
        private double avgPwr = 0.0;//Set, by default the
        emittingPower of a laser. May be changed by a QoT Compensator

        public IACS(network.control.PhysicalParameterDatabaseInterface
        ppdi, database.physical.QoTPolicy QoTPolicy){
            this.ppdi = ppdi;
            this.QoTPolicy = QoTPolicy;

            avgPwr = 0.0;
        }

        public Set<String> giveTreeSections(String emittingPort){
            Set<String> receivingPorts = new TreeSet<String>();
            //Collecting the receiving port of this link
            String receivingPort =
            ppdi.getRemotePortOfEmittingPort(emittingPort);
            receivingPorts.add(receivingPort);
            //For this receiving port, collecting all the output
            ports connected via jumpers and fetch a for each loop
            if(receivingPort != null)
                for (String s :
                ppdi.getEmittingPortsOfJumpers(receivingPort)){
                    receivingPorts.addAll(giveTreeSections(s));
                }
            return receivingPorts;
        }

        public List<String> getPortsPath(String emittingPort, String
        remoteInterface){
            List<String> list = new LinkedList<String>();
            Map<Integer, List<String>> map =
            initReverseDfs(remoteInterface, false);
            try{
                for (Map.Entry<Integer, List<String>> entry :
                map.entrySet()){
                    if(((LinkedList<String>)
                    entry.getValue()).getLast().equals(emittingPort)){
                        list = entry.getValue();
                        ((LinkedList<String>)
                        list).addFirst(remoteInterface);
                    }
                }
            }
        }

```

```

        }
    }
    }catch(NullPointerException e){
        return list;
    }
    return list;
}

    public Map<Integer, List<String>> initReverseDfs(String
receivingPort, boolean unique){
        List<String> settled = new LinkedList<String>();
        List<String> current = new LinkedList<String>();
        Map<Integer, List<String>> map = new HashMap<Integer,
List<String>>();

        getAccessingPathsFrom(receivingPort, settled, current,
map);
        if (unique)
            return flushDoubles(map, receivingPort);
        else
            return map;
    }

    private void getAccessingPathsFrom(String to, List<String>
settled, List<String> current, Map<Integer, List<String>> map){

        settled.add(to);
        settled.add(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));

        Set<String> buf =
ppdi.getReceivingPortsOfJumpers(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to
));
        buf.removeAll(settled);

        if(buf.isEmpty()){
            current.add(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));
            map.put(map.size(), new
LinkedList<String>(current));

            current.remove(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));
        }
        else{
            current.add(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));
            map.put(map.size(), new
LinkedList<String>(current));

            current.remove(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));
        }
        for(String s : buf){

```

```

        if (!settled.contains(s)) {

            current.add(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));
            current.add(s);
            getAccessingPathsFrom(s, settled, current,
map);
            current.remove(s);

            current.remove(ppdi.getRemotePortOfReceivingPort(to));
        }
    }

    private Map<Integer, List<String>> flushDoubles(Map<Integer,
List<String>> map, String port) {
        Set<String> settled = new TreeSet<String>();
        ((LinkedList<String>) map.get(0)).addFirst(port);
        for(Map.Entry<Integer, List<String>> entry :
map.entrySet()) {
            entry.getValue().removeAll(settled);
            settled.addAll(entry.getValue());
        }
        return map;
    }
}
/**
 * ASE computation... Should be ENHANCED !!!
 * Following method is based on the work of Jean Philippe
Savoie
 * It is based on its ASE_calculator_v1.m
 * @param map
 * @param wavelength
 * @return
 */
public Map<Integer, List<Double>> computeASE(Map<Integer,
List<String>> map, double wavelength) {
    Map<Integer, List<Double>> ASE = new HashMap<Integer,
List<Double>>();
    double ase, gainLin, nsp;

    //Computing ase of RECEIVING PORT
    gainLin = Math.pow(10,
ppdi.getPort(map.get(0).get(0)).getAmp().getGain()/10);
    nsp = 0.5*Math.pow(10,
ppdi.getPort(map.get(0).get(0)).getAmp().getNoiseFigure()/10.0);
    ase = 2*nsp*h*c*(gainLin - 1)/(wavelength*1e-9);
    LinkedList<Double> buf = new LinkedList<Double>();
    buf.add(0.0);
    buf.add(ase);
    ASE.put(0, buf);

```

```

        for(Map.Entry<Integer, List<String>> entry :
map.entrySet()) {
            LinkedList<String> portList = (LinkedList<String>)
entry.getValue();

            try{
                //Computing ase of receivingInterface
                gainLin = Math.pow(10,
ppdi.getInterfaceOfPort(portList.getFirst()).getAmp().getGain()/10.0
);
                nsp = 0.5*Math.pow(10,
ppdi.getInterfaceOfPort(portList.getFirst()).getAmp().getNoiseFigure
()/10.0);
                ase = 2*nsp*h*c*(gainLin - 1)/(wavelength*1e-9);

                //Gathering ase of the span
                database.physical.Fiber fib =
ppdi.getLinkOfEmittingPort(portList.getLast());
                for(Iterator<database.physical.Amplifier> iterator
= fib.getAmps().iterator(); iterator.hasNext();){
                    database.physical.Amplifier amp =
iterator.next();
                    gainLin = Math.pow(10, amp.getGain()/10);
                    nsp = 0.5*Math.pow(10,
amp.getNoiseFigure()/10.0);
                    ase += 2*nsp*h*c*(gainLin - 1)/(wavelength*1e-
9);
                }

                //Collecting ase of emittingInterface
                gainLin = Math.pow(10,
ppdi.getInterfaceOfPort(portList.getLast()).getAmp().getGain()/10.0)
;
                nsp = 0.5*Math.pow(10,
ppdi.getInterfaceOfPort(portList.getLast()).getAmp().getNoiseFigure(
)/10.0);
                ase += 2*nsp*h*c*(gainLin - 1)/(wavelength*1e-9);

                //Computing ase of EMITTING PORTS
                gainLin = Math.pow(10,
ppdi.getPort(portList.getLast()).getAmp().getGain()/10);
                nsp = 0.5*Math.pow(10,
ppdi.getPort(portList.getLast()).getAmp().getNoiseFigure()/10.0);
                ase += 2*nsp*h*c*(gainLin - 1)/(wavelength*1e-9);

                //Storing in a map
                LinkedList<Double> data = new LinkedList<Double>();
                data.add(fib.getLength());
                data.add(ase);
                ASE.put(entry.getKey()+1, data);

```

```

        }
        catch(NoSuchElementException e){
            System.out.println("No such element exception
IACS.computeASE() => portList est vide.");
        }
    }
    return ASE;
}

/**
 * Following method is based on the work of Jean Philippe
Savoie
 * It includes its ASE_calculator_v1.m, FacteurQ.m and
BER_calculator.m
 * @param map
 * @return
 */
public List<Double> computeIALinkMetrics(String emittingPort,
String receivingPort, double wavelength){
    List<Double> list = new LinkedList<Double>();
    double totalLength = 0, length = 0, ase = 0, gain = 0,
loss = 0, cd = 0, pmd = 0;
    int nbSpan = 0;
    Map<Integer, List<Double>> map =
computeASE(initReverseDfs(receivingPort, true), wavelength);
    LinkedList<String> path = (LinkedList<String>)
getPortsPath(emittingPort, receivingPort);

    //Computing length and ASE
    for (Map.Entry<Integer, List<Double>> entry :
map.entrySet()){
        totalLength += entry.getValue().get(0);
        ase += entry.getValue().get(1);
    }

    //Computing link gain, loss, CD and PMD
    for(int i=0; i<path.size()/2; i++){
        //Getting link
        database.physical.Fiber fib =
ppdi.getLinkOfEmittingPort(path.get((i*2)+1));
        length += fib.getLength();
        loss += fib.getLength()*fib.getAttenuation();
        cd += fib.getLength()*fib.getCd()*0.1;//TO
PARAMETERIZE
        pmd += Math.sqrt(fib.getLength())*fib.getPmd();

        //Collecting gains and losses of crossed interfaces
        database.physical.Interface interf =
ppdi.getInterfaceOfPort(path.get(i));
        gain += interf.getAmp().getGain();
    }
}

```

```

        loss += 3.5*ppdi.getDegreeOfNode(path.get(i));
        interf =
ppdi.getInterfaceOfPort(path.get((i*2)+1));
        gain += interf.getAmp().getGain();
        loss +=
3.5*ppdi.getDegreeOfNode(path.get((i*2)+1));

        //Gathering gain of in line amplifiers
        for(Iterator<database.physical.Amplifier> iterator
= fib.getAmps().iterator(); iterator.hasNext();) {
            gain += iterator.next().getGain();
            nbSpan++;
        }
        nbSpan++;
    }

    //Adding gain and loss from Rx and Tx
    gain += ppdi.getPort(path.getFirst()).getAmp().getGain();
    loss += ppdi.getPort(path.getFirst()).getCouplingLoss() +
ppdi.getPort(path.getFirst()).getInsertionLoss();
    gain += ppdi.getPort(path.getLast()).getAmp().getGain();
    loss += ppdi.getPort(path.getLast()).getCouplingLoss() +
ppdi.getPort(path.getLast()).getInsertionLoss();

    //Computing Q factor - Based on FacteurQ.m (Jean Philippe
Savoie)
    double A = 1 - nbSpan*CA;
    double B = nbSpan*CB;
    double pin = Math.pow(10, (avgPwr-30 + gain - loss)/10);

    ase *= 1.33;

    double Q = (2*R*(A-
B)*pin)/(Math.sqrt((4*R*(q+ase*R)*A*pin + ase*ase*R*R*(2*Bo-Be))*Be)
+ Math.sqrt((4*R*(q+ase*R)*B*pin +
ase*ase*R*R*(2*Bo-Be))*Be));

    //Computing BER factor - Based on BER_calculator.m (Jean
Philippe Savoie)
    double BER = 1/(Q*Math.sqrt(2*Math.PI))* Math.exp(-
(Math.pow(Q, 2)));

    //OSNR - Standard method of calculus
    double diff = Math.pow(10, (gain - loss)/10);
    double OSNR = 10*Math.log10(pin*diff/(ase*Bo));

    //System.out.println(QoTPolicy.checkOSNR(OSNR));
    if (QoTPolicy.checkOSNR(OSNR)) {
        //Formatting data

```

```

        list.add(totalLength); //0
        list.add(length); //1
        list.add(gain); //2
        list.add(loss); //3
        list.add(ase); //4
        list.add(cd); //5
        list.add(pmd); //6
        list.add(Q); //7
        list.add(BER); //8
        list.add(OSNR); //9
        list.add(avgPwr); //10
        list.add(10*Math.log10(pin)+30); //11
    }
    else
        list.add(OSNR);
    /*System.out.println(totalLength + " km");
    System.out.println(length + " km");
    System.out.println(gain + " dB");
    System.out.println(loss + " dB");
    System.out.println(ase);
    System.out.println((cd+pmd) + " ps");
    System.out.println(Q);
    System.out.println(BER);
    System.out.println(OSNR);
    System.out.println(avgPwr + " dBm");
    System.out.println(10*Math.log10(pin)+30 + " dBm");*/
    return list;
}

public void setPTx(double avgPwr){
    this.avgPwr = avgPwr;
}
}

```


ANNEXE III

VALIDATION DU SIMULATEUR

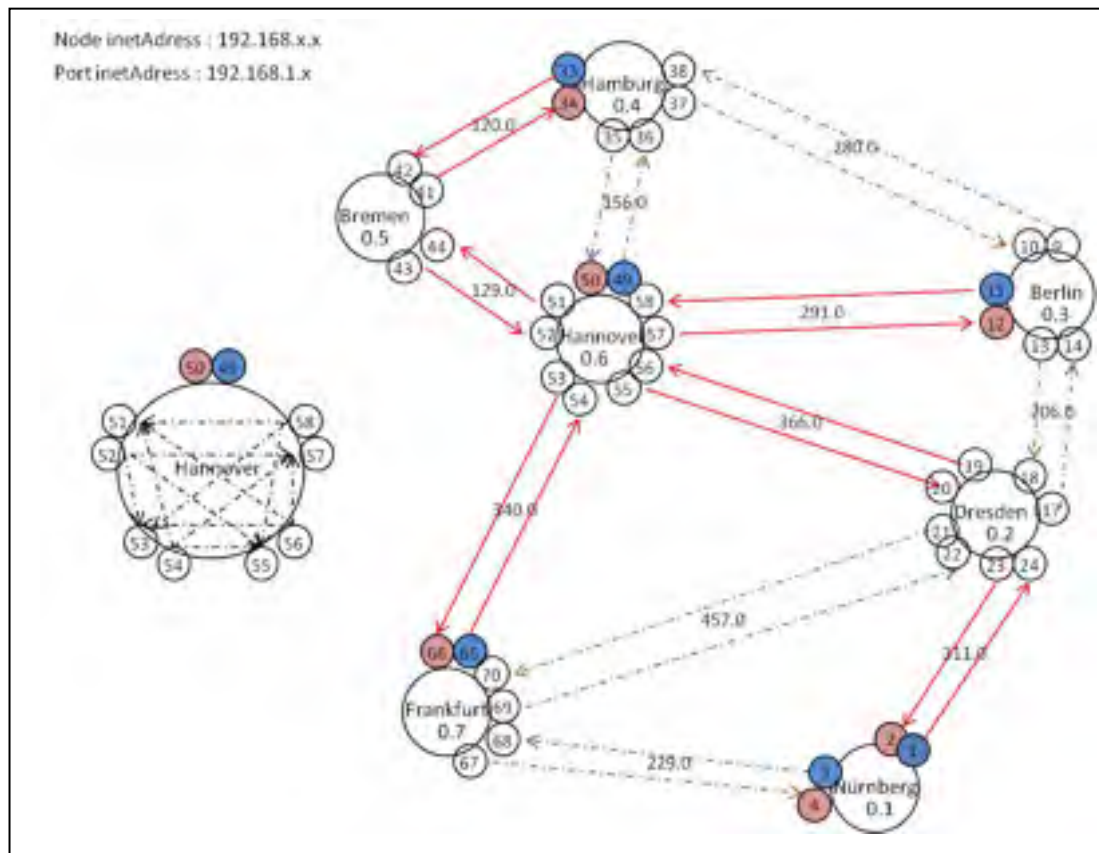


Figure-A III-1 Représentation du réseau de test pour validation du simulateur de plan de contrôle

Results :

 Number of lightpaths : 6
 Number of wavelengths : 4
 Found 6 channels and 17 junk channels
 Utilization : 0 % | 1 % (Wasted)
 36.0 requests were blocked (86 %).

Connections

 192.168.1.33 (Node Hamburg) => 192.168.1.42 (Bremen) : 1530.0nm
 192.168.1.43 (Node Bremen) => 192.168.1.52 (Hannover) : 1530.4nm
 192.168.1.9 (Node Berlin) => 192.168.1.50 (Hannover) : 1530.0nm
 192.168.1.9 (Node Berlin) => 192.168.1.50 (Hannover) : 1530.4nm

```
192.168.1.11 (Node Berlin) => 192.168.1.58 (Hannover) : 1530.8nm
192.168.1.43 (Node Bremen) => 192.168.1.12 (Berlin) : 1531.2nm
```

Network overview

```
-----
```

Nürnberg

```
192.168.1.1
```

```
Channels of this transmitter :
```

```
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
```

```
Junk channels : []
```

```
192.168.1.2
```

```
Channels of this receiver :
```

```
192.168.1.3
```

```
Channels of this transmitter :
```

```
Reserved channels : [1530.0, 1530.4]
```

```
Junk channels : []
```

```
192.168.1.4
```

```
Channels of this receiver :
```

Dresden

```
192.168.1.17
```

```
Channels of this transmitter :
```

```
Reserved channels : [1530.0, 1530.4]
```

```
Junk channels : []
```

```
192.168.1.18
```

```
Channels of this receiver :
```

```
192.168.1.19
```

```
Channels of this transmitter :
```

```
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
```

```
Junk channels : []
```

```
192.168.1.20
```

```
Channels of this receiver :
```

```
192.168.1.21
```

```
Channels of this transmitter :
```

```
Reserved channels : none           Junk channels : []
```

```
192.168.1.22
```

```
Channels of this receiver :
```

```
192.168.1.23
```

```
Channels of this transmitter :
```

```
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
```

```
Junk channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
```

192.168.1.24
Channels of this receiver :

Berlin

192.168.1.9
Channels of this transmitter : 1530.0 1530.4
Reserved channels : [1530.0, 1530.4]
Junk channels : []

192.168.1.10
Channels of this receiver :

192.168.1.11
Channels of this transmitter : 1530.8
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
Junk channels : []

192.168.1.12
Channels of this receiver : 1531.2

192.168.1.13
Channels of this transmitter :
Reserved channels : none Junk channels : []

192.168.1.14
Channels of this receiver :

Hamburg

192.168.1.33
Channels of this transmitter : 1530.0
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
Junk channels : []

192.168.1.34
Channels of this receiver :

192.168.1.35
Channels of this transmitter :
Reserved channels : [1530.0, 1530.4]
Junk channels : []

192.168.1.36
Channels of this receiver :

192.168.1.37
Channels of this transmitter :
Reserved channels : none Junk channels : []

192.168.1.38

Channels of this receiver :

Bremen

192.168.1.41

Channels of this transmitter :

Reserved channels : [1530.8]

Junk channels : [1530.8]

192.168.1.42

Channels of this receiver : 1530.0

192.168.1.43

Channels of this transmitter : 1530.4 1531.2

Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]

Junk channels : [1530.0]

192.168.1.44

Channels of this receiver :

Hannover

192.168.1.49

Channels of this transmitter :

Reserved channels : none Junk channels : []

192.168.1.50

Channels of this receiver : 1530.0 1530.4

192.168.1.51

Channels of this transmitter :

Reserved channels : [1530.8]

Junk channels : [1530.8]

192.168.1.52

Channels of this receiver : 1530.4

192.168.1.53

Channels of this transmitter :

Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]

Junk channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]

192.168.1.54

Channels of this receiver :

192.168.1.55

Channels of this transmitter :

Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]

Junk channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]

192.168.1.56

Channels of this receiver :

192.168.1.57
Channels of this transmitter :
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1531.2]
Junk channels : [1530.0, 1530.4]

192.168.1.58
Channels of this receiver : 1530.8

Frankfurt

192.168.1.65
Channels of this transmitter :
Reserved channels : [1530.0, 1530.4, 1530.8, 1531.2]
Junk channels : []

192.168.1.66
Channels of this receiver :

192.168.1.67
Channels of this transmitter :
Reserved channels : none Junk channels : []

192.168.1.68
Channels of this receiver :

192.168.1.69
Channels of this transmitter :
Reserved channels : [1530.0, 1530.4]
Junk channels : []

192.168.1.70
Channels of this receiver :

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abtahi, F. et al., *Optimal design of cost- and energy-efficient scalable passive optical backbone networks*, IEEE/OSA/SPIE Asia Communications and Photonics (ACP'12) Conf., Guangzhou, China, November 7-10, 2012, Paper AS3D.4.
- Agrawal, G. 2010. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4ème édition. New York. Wiley. 603 p.
- Agraz, F., et al. 2010. « Experimental Demonstration of Centralized and Distributed Impairment-Aware Control Plane Schemes for Dynamic Transparent Optical Networks ». In *Optical fiber Communications* (Barcelone, 21 -25 Mars 2010). 3 p.
- Ali, M. 2005. « Routing of 40-Gb/s Streams in Wavelength-Routed Heterogeneous Optical Networks ». In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 8, pp.1632-1642
- Archambault, E. 2008. *Plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filter. Mémoire. Montréal. Ecole de technologie supérieure*. 96 p.
- Archambault, J-L. 2011. Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer Node Automated Topology Discovery Systems and Methods. USPTO. US 2011/0262142 A1. 14 p.
- Betker, A. et al., 2003. «Reference transport network scenarios» Technical Report (BMBF MultiTeraNet Project, July 2003). En ligne. http://www.ikr.uni-stuttgart.de/IKRSimLib/Usage/Referenz_Netze_v14_full.pdf. Consulté le 12 Octobre 2012.
- Cao, Y. et al. 2009. « Collision avoidance wavelength assignment scheme for distributed path restoration in optical networks ». *Business Media*. Springer Science. 6 p.
- Cassidy, A. 2012. *Performance dynamique de réseaux optiques sans filtre: ressources réseau et qualité de transmission. Mémoire. Montréal École de technologie supérieure*. 156 p.
- Castoldi P. et al. 2007. « Centralized vs. Distributed Approaches for Encompassing Physical Impairments in Transparent Optical Networks ». Tomkos et al. 8 p.
- Chen, J. et al. 2011. « Passive wide area network solutions: Filterless and semi-filterless optical networks ». In *13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 1 p.

- China Internet Network Information Center. *The 26th Survey Report*. En ligne. <http://www.cnnic.cn/uploadfiles/pdf/2010/8/24/93145.pdf>. Consulté le 13 Septembre 2011.
- Ciena. 2011. *F10-T Transponder Module For the 4200 family*. En ligne. http://media.ciena.com/documents/F10-T_Transponder_Module_DS.pdf. Consulté le 4 juin 2012.
- Ciena. *Intelligent Optical Control Plane Architecture - Ciena Delivers Simplicity, Cost Reduction and Revenue Growth*. En ligne. http://media.ciena.com/documents/Intelligent_Optical_Control_Plane_Architecture_WP.pdf. Consulté le 4 avril 2012.
- Cisco. 2005. *Cisco PNNI Network Planning Guide for MGX and SES Products, Release 5.2*. En ligne. http://www.cisco.com/en/US/docs/switches/wan/mgx/mgx_8850/software/mgx_r5.2/data/pnni/network/planning/guide/fbpnnibk.pdf. Consulté le 4 avril 2012.
- Cisco. *Cisco VNI Resources - Projecting global IP traffic growth. VNI Forecast Widget*. En ligne. http://www.ciscovni.com/vni_forecast/index.htm. Consulté le 13 septembre 2011.
- Cugini, F., Paolucci, F., Valcarenghi, L., et Castoldi, P. 2007, « Implementing a Path Computation Element (PCE) to encompass physical impairments in transparent networks, » *Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. OFC/NFOEC 2007.*, vol., no., pp.1-3, 25-29
- Devarajan, A., et al. 2010 « Colorless, Directionless and Contentionless multi-degree ROADM architecture for mesh optical networks, » *Second International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pp.1-10, 5-9
- Duncan, G-R. *Mapping the Internet - Technology Review*. En ligne. <http://www.technologyreview.com/Infotech/18944/>. Consulté le 5 octobre 2011.
- Enriquez Castillo, A. 2010. *Conception et simulation de réseaux optiques sans filtre longue distance*. Rapport de projet. Montréal. Ecole de technologie supérieure. 72 p.
- Fang, J., He, W et Somani, A.K. 2004. « Optimal Light Trail Design in WDM Optical Networks ». In *2004 IEEE International Conference on Communications* (Iowa State University, 20-24 juin 2004). 4 p.

- Farel, A., J.-P Vasseur. et J. Ash. 2006. *RFC 4655 - A Path Computation Element (PCE) - Based Architecture*. En ligne. <http://tools.ietf.org/html/rfc4655>. Consulté le 5 mai 2012.
- Farel, A., Ayyangar, A. et Vasseur JP. 2008. *RFC5151 Inter-Domain MPLS and GMPLS Traffic Engineering -- Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions*. En ligne. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5151.txt>. Consulté le 4 avril 2012.
- Gaglianello, Bob. *MPCP: Multi-Point Control Protocol for EPONs*. En ligne. http://www.ieee802.org/3/efm/public/sep02/sec/Gaglianello_sec_1_0902.pdf. Consulté le 17 mai 2012.
- Giorgetti, A. et N. Andriolli, S. Ruepp, P. Castoldi. 2010. « PCE-based vs. Distributed Set Up of Bidirectional Lightpaths in GMPLS-controlled Optical Networks ». In *Optical Fiber Communications* (Pise, Italie, 21 - 25 mars 2010). 3 p.
- Goell, E. et V. Roanoke. 1976. Multi-core optical communications fiber. USPTO 4000416. 5p.
- Gumaste, A. et I. Chlamtac. 2004. *Light-trails : an optical solution for IP transport*. Journal of Optical Networking. Vol. 03. n°5. 21 p. Gumaste A., Jain, S. et Somain A.K. 2009. « An Efficient Superscheduler Architecture and Job Migration Algorithm for Computational Grids over Light-trail WDM Networks ». In *Broadband Communications, Networks, and Systems*, (Bombay, 14 – 16 septembre 2009) . 8 p.
- Hui, R. et M. O'Sullivan. 2009. *Fiber Optic Measurement Techniques*. 1^{ère} édition. Amsterdam : Elsevier/Academic Press. 652 p.
- Idzikowski, F.. 2009. *Power consumption of network elements in IP over WDM networks*. Rapport technique. Berlin. Technische Universität Berlin.
- Institut national de la statistique et des études économiques. *Conditions de vie-Société - Deux ménages sur trois disposent d'internet chez eux*. En ligne. http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1340#inter3. Consulté le 13 septembre 2011
- Internet World Stats. World Internet Usage Statistics News and World Population Stats. En ligne. <http://www.internetworldstats.com/stats.htm>. Consulté le 13 septembre 2011.
- Jajszczyk, A. *Control Plane for Optical Networks: The ASON Approach*. China Communications - Opening Issues. 2004. 10 p.
- Katz, D. et al. 2003. *RFC3630 Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2*. En ligne. <http://tools.ietf.org/html/rfc3630>. Consulté le 4 avril 2012.

- Kaur, G., et A. K. Sharda. 2008. *Performance analysis of FWM in multichannel systems*. 4 p.
- Khanmohamadi, S., et al. 2011. « Semi-filterless optical network : a cost-efficient passive wide area network solution with effective resource utilization ». In *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* (Shangai, 8-12 Décembre 2010). 3 p.
- Keiser, G.. 2000. *Optical fiber communications*. Toronto : McGraw-Hill Boston. 602 p.
- Koo, S. et G. Sahin, S. Subramaniam. 2004. « Dynamic LSP Provisioning in Overlay, Augmented, and Peer Architectures for IP/MPLS over WDM Networks ». In *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* (George Wahington University, DC, 7-11 Mars 2004). 10 p.
- Lang, J. 2005. RFC 4204 Link Management Protocol (LMP). En ligne. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4204.txt>. Consulté le 4 avril 2012.
- Lavallée, B. 2011. What is Gridless Networking?. En ligne. <http://www.ciena.com/corporate/blog/What-is-Gridless-Networking.html>. Consulté le 7 mai 2012.
- Lightwave online. 2011. Alcatel-Lucent extends reach of 100-Gbps transmission. En ligne. <http://www.lightwaveonline.com/articles/2011/12/alcatel-lucent-extends-reach-of-100-gbps-transmission-135093808.html> Consulté le 19 mai 2012.
- Malkiha, M.. 2011. *Analysis of nonlinear effects and their mitigation in fiber-optic communication systems*. Thèse. Hamilton (Ontario) : McMaster University. 112 p.
- Mantelet, G., C. Tremblay, D. V. Plant, M. Belanger et P. Littlewood. 2012. *PCE-based centralized control plane for filterless networks*. soumis à IEEE Journal of Communications.
- Middleton, C., B. Veenhof et J. Leith. 2010. *Intensité de l'utilisation d'Internet au Canada : comprendre les différents types d'utilisateurs*. En ligne. <http://www.statcan.gc.ca/pub/88f0006x/88f0006x2010002-fra.htm>. Consulté le 13 septembre 2011.
- Mukherjee, B.. 2006. *Optical WDM Networks* . 1^{ère} édition. Springer Optical Networks Series. 1000 p.
- Nederlof, L., et al. 2001. *Value proposition for configurable optical network elements*. Optical Society of America. 3 p.

- Nortel. 2009. *Common Photonic Layer Planning Guide, Part 1 of 2. Standard. Release 4.0.* 248 p.
- NTT. News Release 060929a. En ligne.
<http://www.ntt.co.jp/news/news06e/0609/060929a.html>. Consulté le 19 janvier 2010.
- OIF Forum. 2008. *User Network Interface (UNI) 2.0 Signaling Specification.* En ligne.
<http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-UNI-02.0-Common.pdf>.
 Consulté le 4 avril 2012
- Oki, E., et al. 2005, *Dynamic multilayer routing schemes in GMPLS-based IP+optical networks*, Communications Magazine, IEEE , vol.43, no.1, pp.108-114,
- Ramamurthy R., S. Sudipta et S. Chaudhuri. 2001. *Comparison of Centralized and Distributed Provisioning of Lightpaths in Optical Networks.* Optical Society of America. 3 p.
- Ramaswami, R. et K. N. Sivarajan. 2002. *Optical Networks : a Practical Perspective.* 2^{ème} édition. San Fransisco : Morgan Kaufman Publishers. 831 p.
- Roberts, K., et al. 2010. *100G and Beyond with Digital Coherent Signal Processing.* IEEE Communications Magazine. 8 p.
- Sahasrabuddhe, L.H., Mukherjee B. 1999. *Light-trees : optical multicasting for improved performance in wavelength routed networks.* IEEE Communications Magazine. 7 p.
- Salvadori, E.. et al. 2007. *A Study of Connection Management Approaches for an impairment-aware Optical Control Plane.* Tomkos et al. 10 p.
- Salvadori, E. et al. 2009. *Distributed Optical Control Plane Architectures for Handling Transmission Impairments in Transparent Optical Networks.* Journal of Lightwave Technology. Vol. 27, N°3. 16 p.
- Saradhi, C. V. et S. Subramaniam. 2009. *Physical Layer Impairment Aware Routing (PLIAR) In WDM Optical Networks : Issues and Challenges.* IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. 11. N°4. 22 p.

- Savoie, J.-P. 2010. *Prototype de validation de la couche physique d'un réseau optique sans filtre*. Mémoire. Montréal. Ecole de technologie supérieure. 150 p.
- Savoie J.-P., C. Tremblay, D. V. Plant, et M. Bélanger. 2010. « Physical Layer Validation of Filterless Optical Networks ». In *European Conference and Exhibition on Optical Communication* (Turin. Italie. 19-23 Septembre 2010). 3 p.
- Senior, J. M. 2009. *Optical fiber communications : principles and practice*. 3ème édition. New York : Prentice Hall. 1075 p.
- Tang, J.. 2007. *The Channel Capacity of a Multispan DWDM System Employing Dispersive Nonlinear Optical Fibers and an Ideal Coherent Optical Receiver*. Journal of lightwave technology. Vol. 20. 7 p.
- Tremblay, C., F. Gagnon et Benoit Châtelain. 2006. *Filterless Optical Networks Final Report*.
- Tremblay, C. et al. 2010. « Passive filterless core networks based on advanced modulation and electrical compensation technologies ». In *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* (Shangai, 8-12 Décembre 2010). 26 p.
- Tremblay C.. 2012. *ELE772 : Communications optiques*. Programme de Baccalauréat en génie électrique. Montréal : Ecole de technologie supérieure.
- U.S. Census Bureau. The 2011 Statistical Abstract: Internet Publishing and Broadcasting and Internet Usage. En ligne.
<http://www.census.gov/compendia/statab/2011/tables/11s1158.pdf>. Consulté le 13 septembre 2011
- Ying W., et al. 2010, « Double Cooperating PCEs for IA-RWA computation with QoT compensation in transparent optical networks, » *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, , pp.1-3, 19-23
- Weisstein, E. W. 2003. *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*. 2ème édition. Chapman et Hall. CRC Press. 3242 p.
- Ye, Y., H. Woesner et I. Chlamtac. 2006. « Traffic Grooming Techniques in Optical Networks. » *3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, BROADNETS 2006.*, pp.1-9, 1-5.